Kb
534

В. С. КУЛЕБАКИН

ПУСКОВЫЕ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ РЕОСТАТЫ

RS 4092

25630 Кулебакин.
Пуск. и рег. реост.
2/1 Ликвид IV
Инвентар

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока.

Обработана библиотечным коллектором Госиздата РСФСР. Киев, ул. Воровского № 38.

Київ, Окрліт 01647, друк. Штад. 45 з.338-29 р.—600 т.

В. С. КУЛЕБАКИН

ПРОФЕССОР МОСКОВСКОГО ВЫСШЕГО ТЕХНИЧЕСКОГО УЧИЛИЩА И ВОЕННОЙ ВОЗДУШНОЙ АКАДЕМИИ

621.316.8

ПУСКОВЫЕ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ РЕОСТАТЫ

~~621.316~~
К90

Кв 475

Київський Енергетичний Інститут
БІБЛІОТЕКА
ч. 9870

1929

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА ★ ЛЕНИНГРАД

О Т П Е Ч А Т А Н О
в 1-й Образцовой типографии
Гиза. Москва, Пятницкая, 71.
Главлит А-27073. Н.60. Гиз 27823.
Заказ № 2 517. Тираж 3 000 экз.

ПРЕДИСЛОВИЕ.

*

Реостаты являются неотъемлемой частью почти каждой электрической установки; между тем как рабочему процессу, так устройству и расчету этих весьма распространенных электрических аппаратов уделяется сравнительно немного внимания в технической литературе; в частности в СССР нет ни одной книги, посвященной этому вопросу, да и за границей по реостатам имеется всего лишь несколько книг. Обычно о реостатах говорится во всех курсах по электрическим машинам, но в этих курсах ограничиваются в большинстве случаев кратким указанием относительно способов определения числа ступеней реостата и сопротивлений их; эти указания, однако, далеко недостаточны для того, чтобы рассчитать и рационально сконструировать реостат.

Автор задался целью заполнить имеющийся в нашей технической литературе пробел в отношении реостатов, и настоящая книга представляет собой изложение в систематизированном виде наиболее важных вопросов, относящихся к устройству, нагреву и охлаждению и расчету металлических и жидкостных реостатов наиболее распространенных видов.

Книга разбита на три части. Первая часть касается главным образом устройства реостатов, конструктивных и расчетных данных относительно этих аппаратов.

Вторая часть книги посвящена процессу нагрева и охлаждения однородных тел; теория этих процессов является основой расчета элементов сопротивления реостатов в тепловом отношении.

В третьей части излагаются методы расчетов пусковых реостатов, регуляторов возбуждения, пуско-регулирующих реостатов, осветительных регуляторов и реостатов особого вида.

В книге можно найти указания относительно правил для оценки реостатов.

Материалом для книги служили главным образом иностранная литература, работы и достижения в области реостато-строения за

последние годы, а также записи лекций по курсу „Электрические приборы и аппараты“, читаемому автором на электротехническом факультете в Московском высшем техническом училище.

При составлении книги принимали весьма деятельное участие инж. Ю. В. Буткевич и студент МВТУ А. М. Сенкевич, оказавшие автору большую помощь в обработке некоторых глав, переписке рукописи и изготовлении чертежей. Кроме того в помощи автору принимал участие и студент Н. В. Горохов. Всем этим лицам автор считает своим долгом здесь выразить свою искреннюю благодарность.

В. С. Кулебакин.

Москва.
28 ноября 1927 г.

*

ОГЛАВЛЕНИЕ.

*

Стр.

Предисловие V

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ.

ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О ПУСКОВЫХ И РЕГУЛИРУЮЩИХ РЕОСТАТАХ.

Введение 1

Глава первая. *Устройство металлических реостатов.*

§ 1. Материалы, идущие на изготовление сопротивлений 3
§ 2. Различные виды устройства элементов сопротивления 5
§ 3. Внутренние соединения 18
§ 4. Переключатели ступеней . . . . . —
a) плоские переключатели 20
b) барабанный переключатель 23
c) вальковый переключатель 24
d) контакторный переключатель 27
§ 5. Зажимы для внешних проводов 28
§ 6. Предохранительные приспособления для пусковых реостатов 29
§ 7. Остов и кожух 30
§ 8. Охлаждение металлических реостатов 33
a) воздушное охлаждение 34
b) масляное охлаждение . . . . . —
c) песочное охлаждение 36
§ 9. Управление металлическими реостатами 37

Глава вторая. *Жидкостные реостаты.*

§ 10. Особенности устройства жидкостных реостатов 43
§ 11. Жидкостные реостаты с подвижными электродами 45
§ 12. Жидкостные реостаты с перемещающимся уровнем жидкости 49
§ 13. Горячие водяные реостаты 52
§ 14. Фитильный жидкостный реостат Дрейера 55
§ 15. Растворы, применяемые в жидкостных реостатах 56

Стр.

Глава третья. *Схемы включения пусковых реостатов.*

§ 16. Общие соображения 60
§ 17. Схемы включения реостатов для шунтовых двигателей 63
§ 18. Схемы включения реостатов для сериесных двигателей 67
§ 19. Сводка схем включения пусковых реостатов для двигателей постоянного тока 70
§ 20. Схема включения реостатов для трехфазных асинхронных двигателей . . 71
§ 21. Включение пусковых жидкостных реостатов постоянного и переменного тока 75

Глава четвертая. *Регуляторы возбуждения и пуско-регулирующие реостаты.*

§ 22. Классификация и особенности конструкции регуляторов возбуждения . . 78
§ 23. Схемы включения регуляторов возбуждения 79
a) шунтовые регуляторы для генераторов постоянного тока . . . . . —
b) регуляторы возбудителей синхронных машин 81
c) регулятор главной цепи возбуждения синхронных машин 82
d) каскадный способ регулировки синхронных генераторов 83
e) шунтовый генератор возбуждения для двигателей постоянного тока . . —
f) шунтовые регуляторы возбуждения для одноякорных преобразователей переменного тока в постоянный 84
g) регуляторы возбуждения для мотор-генераторов . . . . . —
§ 24. Пуско-регулирующие реостаты . . . . . —

ЧАСТЬ ВТОРАЯ.

НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ОДНОРОДНЫХ ТЕЛ.

Глава пятая. *Общая теория нагрева и охлаждения однородных тел.*

§ 25. Основные законы теплоотдачи 89
a) лучеиспускание . . . . . —
b) конвекция 92
c) теплопроводность 94
§ 26. Процесс нагрева тела 96
a) при кратковременной нагрузке . . . . . —
b) общие уравнения нагревания 99
c) постоянная времени нагрева 105
§ 27. Косвенные методы определения максимального повышения температуры . . 107
a) метод Лоппе и Томпсона 108
b) метод Тоннелье 110
c) метод Союза германских электротехников 111
d) метод Лис и Тоннелье 113
e) метод Бюро 115
§ 28. Определение коэффициента перегрузки 117
a) кратковременная нагрузка . . . . . —
b) прерывистая нагрузка 118

Стр.
c) перемежающаяся нагрузка 121
d) сопоставление коэффициентов перегрузки для различных видов нагрузки 126
§ 29. Процесс нагрева при непрерывно изменяющейся нагрузке 129
§ 30. Косвенные методы построения кривых нагрева 132
a) метод Гута 133
b) графический метод Кнорра 136

Глава шестая. *Приложение теории нагрева к расчету элементов сопротивления реостатов.*

§ 31. Кратковременная нагрузка 141
§ 32. Продолжительная нагрузка 147
§ 33. Расчет элементов сопротивления на нагрев при продолжительной нагрузке 150
a) зависимость объема материала от формы сечения проводника . . . . —
b) зависимость повышения температуры от нагрузочного тока 153
§ 34. Влияние формы сопротивления 155
§ 35. Нагрев реостатов с заполнением 164

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ.

РАСЧЕТ РЕОСТАТОВ.

Глава седьмая. *Плавный пуск в ход двигателей.*

§ 36. Электрический процесс пуска 173
§ 37. Разбег и его продолжительность 177
§ 38. Нагревание сопротивлений 181
§ 39. Ход расчета для изменяющегося нагрузочного момента 185
§ 40. Расход энергии при пуске 191

Глава восьмая. *Ступенчатый пуск в ход двигателей постоянного тока.*

§ 41. Основные определения и положения 197
§ 42. Определение числа ступеней и их сопротивления 207
a) аналитический способ Яссе . . . . . —
b) аналитический способ Гуннуса 216
c) аналитический способ автора 221
d) номографический метод 223
§ 43. Разбег двигателя и его продолжительность 233
§ 44. Нагревание сопротивлений 239
§ 45. Пуск в ход под переменной нагрузкой 247

Глава девятая. *Ступенчатый пуск в ход асинхронных двигателей.*

§ 46. Диаграммы токов и напряжений 254
§ 47. Графический метод расчета сопротивлений ступеней 263
§ 48. Определение продолжительности времени пуска в ход двигателя 268
§ 49. Нагревание сопротивлений ступеней реостата 273
§ 50. Пример расчета 277

Стр.

Глава десятая. *Расчет жидкостных реостатов с перемещающимся уровнем жидкости.*

§ 51. Нагревание реостата 291
§ 52. Электроды 295
§ 53. Охлаждение 301
§ 54. Схема расчета 306

Глава одиннадцатая. *Регуляторы возбуждения.*

§ 55. Графический метод определения сопротивлений ступеней регулятора самовозбуждающихся машин 319
§ 56. Расчет ступеней регулятора для независимого возбуждения машин 324
§ 57. Объемная мощность регуляторов для машин самовозбуждающихся и с независимым возбуждением 327
§ 58. Потери в регуляторах возбуждения 333
§ 59. Регуляторы для заданного тока возбуждения. 336
a) определение числа ступеней . . . . . —
b) объемная мощность регулятора 342
c) потери в регуляторе 343
§ 60. Графо-аналитический метод расчета регуляторов возбуждения . . . . . —
a) независимое возбуждение 344
b) шунтовое возбуждение 350
§ 61. Регуляторы поля для двигателей 355
§ 62. Регуляторы тока главной цепи двигателя 358
§ 63. Сопротивления для прерывателей цепи тока возбуждения 359

Глава двенадцатая. *Осветительные регуляторы.*

§ 64. Регуляторы напряжения для ламп накаливания 365
§ 65. Реостаты для регулирования силы света ламп накаливания 370
a) характеристики ламп накаливания 371
b) определение сопротивления ступеней реостата 373
c) регулировка светового потока группы параллельно соединенных ламп . 377
§ 66. Регуляторы для дуговой лампы (балластные реостаты) 378
a) общие свойства вольтовой дуги . . . . . —
b) определение сопротивлений реостата 380
c) мощность, поглощаемая ступенями реостата 388

Глава тринадцатая. *Реостаты с экономическим использованием материала.*

§ 67. Реостаты для плавной регулировки 390
§ 68. Реостаты для ступенчатой регулировки 397

Глава четырнадцатая. *Особые виды реостатов.*

§ 69. Реостаты для широкой регулировки силы тока 405
§ 70. Комбинированные реостаты для грубой и тонкой регулировки 409
§ 71. Реостаты со скользящим контактом 412
Библиография 417

*

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О ПУСКОВЫХ И РЕГУЛИРУЮЩИХ РЕОСТАТАХ

ВВЕДЕНИЕ.

*

Реостатом называется прибор, состоящий из омического сопротивления, которое можно изменять (регулировать). Омическое сопротивление является главной составной частью реостата, и оно служит для поглощения электрической энергии и превращения ее в тепловую, согласно закону Джоуля (Joule). Нерегулирующиеся сопротивления обычно называются просто сопротивлениями.

Сопротивления и реостаты включаются в цепь электрического тока с целью или понижения напряжения или изменения силы тока. Они разделяются на следующие основные группы:

1) постоянные сопротивления;

2) пусковые реостаты или приборы, служащие для ограничения силы тока во время пуска в ход двигателей;

3) регулирующие реостаты или приборы, предназначаемые для регулировки в известных пределах силы тока или падения напряжения в цепи тока, в которую они включены. К этой группе приборов относятся: реостаты, служащие для регулирования скорости вращения электродвигателей, реостаты, предназначаемые для регулировки силы тока возбуждения электрических машин, фидерные реостаты, ламповые реостаты (для дуговых ламп и ламп накаливания), нагрузочные реостаты, реостаты, применяемые для зарядки аккумуляторных батарей, реостаты лабораторного типа и т. д.

Реостаты являются почти неотъемлемой частью каждой электрической установки, и от правильного выполнения и включения этого прибора в значительной мере зависит надежность действия всей установки, поэтому и реостаты должны удовлетворять определенным техническим требованиям.

Все применяемые в настоящее время пусковые и регулировочные реостаты можно подразделить на две основные группы, именно: на металлические и жидкостные.

*

ГЛАВА I.

УСТРОЙСТВО МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕОСТАТОВ.

*

Металлический реостат нормального типа составляется из следующих основных частей:

a) элементов сопротивления,

b) внутренних соединительных проводников,

c) переключателя ступеней,

d) зажимов для приключения внешних проводов,

e) автоматических приспособлений для предохранения электрической машины или аппарата и самого реостата от чрезмерных перегрузок,

f) кожуха и остова.

§ 1. Материалы, идущие на изготовление сопротивлений. — Важнейшие требования, которые предъявляются к материалам, идущим на изготовление сопротивлений реостатов, это: высокое удельное сопротивление, высокая температура плавления, способность выдерживать длительный нагрев до 250—300° C, малая чувствительность к механическим сотрясениям и к атмосферным условиям при рабочей температуре и, наконец, невысокая стоимость.

Все тянутые материалы, идущие на изготовление сопротивлений, можно разбить на следующие основные группы:

a) сплавы с удельным сопротивлением в $0{,}5\ \frac{\Omega mm^2}{m}$ $\left(\text{в пределах } 0{,}47 \div 0{,}52\ \frac{\Omega mm^2}{m}\right)$, свободные от цинка и железа;

b) сплавы с удельным сопротивлением в $1{,}0\ \frac{\Omega mm^2}{m}$ $\left(\text{в пределах } 0{,}85 \div 1{,}1\ \frac{\Omega mm^2}{m}\right)$;

c) железная проволока с удельным сопротивлением в $0{,}13\ \frac{\Omega mm^2}{m}$ $\left(\text{в пределах } 0{,}11 \div 0{,}14\ \frac{\Omega mm^2}{m}\right)$,

d) сплавы с удельным сопротивлением в 0,30 $\frac{\Omega mm^2}{m}$ (в пределах 0,28 ÷ 0,32 $\frac{\Omega mm^2}{m}$), свободные от железа.

Сплавы с удельным сопротивлением в 0,50 $\frac{\Omega mm^2}{m}$ применяются для пусковых и особенно для регулирующих реостатов всех видов. К этим материалам относятся сплавы меди-никеля или меди-марганца. Сплавы эти обладают малым температурным коэффициентом сопротивления, рекомендуются для применения в тех случаях, когда ставятся серьезные требования в отношении надежности действия и постоянства сопротивления, независимо от температуры нагрева.

К числу этих сплавов относятся: константан (*Cu* 58, *Ni* 41, *Mn* 1), реостатин, реотан (*Cu* 55, *Ni* 25, *Zn* 16, *Fe* 4), идеал (*Cu* 55, *Ni* 45), адванс (*Cu* 54,5, *Ni* 45, *Fe* 0,5), манганин (*Cu* 84, *Mn* 13, *Ni* 2, *Fe* 1) и т. п.

К этим сплавам принадлежат: хромель *A*, хромалон IV (*Ni* 80, *Cr* 20), нихром (*Ni*, *Fe*, *Cr*), круппин (*Ni*, *Fe*, *C*), сихром (*Si*, *Cr*, *Fe*) и пр.

Сплавы с удельным сопротивлением в 1,0 $\frac{\Omega mm^2}{m}$ идут на изготовление высокоомных сопротивлений (добавочных сопротивлений, сопротивлений, приключаемых параллельно к индукторным обмоткам электрических машин). Эти сплавы состоят из хрома-никеля, хрома-никеля-железа или железа-никеля. При применении этих сплавов необходимо иметь в виду, что температурный коэффициент их относительно велик.

Железная проволока применяется для пусковых реостатов. Так как железная проволока обладает большим температурным коэффициентом сопротивления, то она совершенно не допускается для реостатов возбуждения, а так же для тех ступеней пуско-регулирующих реостатов, которые предназначаются для регулировки скорости вращения двигателя.

Применение железной проволоки для изготовления сопротивления диаметром менее 0,5 *mm* не допускается.

Оцинкованные железные проволоки следует соединять между собою только посредством оцинкованных же болтов или винтов; луженые же проволоки спаиваются оловом.

Сплавы с удельным сопротивлением в 0,3 $\frac{\Omega mm^2}{m}$ содержат цинк, медь и никель (пейзильбер, мельхиор *Cu* 63, *Ni* 6, *Zn* 31). Ввиду небольшой прочности проволок, изготовляемых из этих сплавов, допускается применение только таких проволок, диаметр которых не менее 1,6 *mm*.

Несколько промежуточное положение в отношении удельного сопротивления занимает никелин (Cu 54, Ni 26, Zn 20); удельное сопротивление этого сплава составляет около $0{,}4\,\frac{\Omega mm^2}{m}$.

В таблице 1 приведены данные относительно сопротивлений проволок, выполненных из вышеуказанных сплавов.

Кроме того в таблицах 2, 3 и 4 приведены более подробные данные о никелине, константане и нихроме.

В качестве литого материала, идущего на изготовление сопротивлений, обычно применяют чугун. Удельное сопротивление этого материала равняется около $0{,}8\,\frac{\Omega mm^2}{m}$, причем этот материал обладает большим температурным коэффициентом [около $(7{,}5 \div 15)10^{-4}$]. Сопротивления, изготовленные из чугуна, выполняются в виде зигзагообразных пластин толщиною от 2,5 mm; к концам этих элементов сопротивления приливаются ушки, служащие для скрепления элементов вместе или присоединения проводов. Чугунные сопротивления применяются обычно в тех ступенях сопротивления, где не требуется постоянства сопротивления, а также в тех случаях, когда реостат подвергается механическим сотрясениям (в подвижных установках).

§ 2. Различные виды устройства элементов сопротивления.— Устройство элементов сопротивления в зависимости от материала сопротивления, вида установки реостата (стационарная или транспортирующая установка), охлаждения реостата и формы материала сопротивления (проволока, лента и т. д), получает различные конструктивные выполнения. В дальнейшем рассматриваются кратко различные виды устройства элементов сопротивления.

Спирали из проволоки или ленты допускаются вообще только для стационарных установок, которые не подвергаются заметному действию толчков и сотрясений. Проволочные спирали, если они помещаются в воздухе или в масле, должны достаточно хорошо пружинить и быть закрепленными в натянутом состоянии в реостате так, чтобы была исключена возможность замыкания их между собою при случайных толчках или сотрясениях. Ленточные спирали обладают еще большей эластичностью, чем проволочные и потому применяются только огражденными от соседних спиралей или частей аппарата какими-либо негорючими перегородками.

Спирали из круглой проволоки или ленты часто помещаются на трубках из прессованного азбеста, твердо закрепленных на остове реостата. Такое устройство элементов сопротивления позволяет получать более компактные размеры реостата ввиду возможности размещения спиралей друг от друга на более близком расстоянии.

Таблица 1.

Нормальный диаметр	Группа *a*		Группа *b*		Группа *c*		Группа *d*	
	Сопротивление 1 *m* в Ω	Допустимые ± отклонения на 1 *m* в Ω	Сопротивление 1 *m* в Ω	Допустимые ± отклонения на 1 *m* в Ω	Сопротивление 1 *m* в Ω	Допустимые ± отклонения на 1 *m* в Ω	Сопротивление 1 *m* в Ω	Допустимые ± отклонения на 1 *m* в Ω
0,1	63,7	3,9	127	7,6	—	—	—	—
0,11	52,6	3,1	105	6,3	—	—	—	—
0,12	44,2	2,6	88,5	5,3	—	—	—	—
0,14	32,5	2,0	65,0	3,9	—	—	—	—
0,16	24,9	1,5	50,0	3,0	—	—	—	—
0,18	19,6	1,2	39,2	2,3	—	—	—	—
0,20	15,9	0,9	31,8	1,9	—	—	—	—
0,22	13,16	0,79	26,3	1,6	—	—	—	—
0,25	10,20	0,61	20,4	1,2	—	—	—	—
0,28	8,12	0,47	16,2	0,94	—	—	—	—
0,30	7,08	0,4	14,2	0,81	—	—	—	—
0,35	5,20	0,28	10,4	0,56	—	—	—	—
0,40	3,97	0,21	7,94	0,41	—	—	—	—
0,45	3,14	0,16	6,28	0,32	—	—	—	—
0,5	2,55	0,12	5,10	0,25	0,662	0,050	—	—
0,55	2,10	0,099	4,20	0,20	0,550	0,039	—	—
0,6	1,77	0,083	3,55	0,17	0,460	0,034	—	—
0,65	1,51	0,068	3,02	0,14	0,396	0,030	—	—
0,7	1,30	0,057	2,60	0,11	0,339	0,026	—	—
0,8	0,995	0,042	1,99	0,08	0,259	0,020	—	—
0,9	0,786	0,032	1,57	0,064	0,204	0,016	—	—
1,0	0,637	0,025	1,27	0,051	0,166	0,013	—	—
1,1	0,526	0,020	1,05	0,041	0,137	0,011	—	—
1,2	0,442	0,017	0,886	0,034	0,115	0,009	—	—
1,4	0,325	0,012	0,650	0,024	0,085	0,007	—	—
1,6	0,249	0,0089	0,498	0,018	0,065	0,005	0,150	0,0054
1,8	0,196	0,0069	0,392	0,014	0,051	0,004	0,118	0,0041
2,0	0,159	0,0054	0,318	0,011	0,041	0,003	0,0954	0,0033
2,2	0,131	0,0044	0,262	0,0088	0,034	0,003	0,0792	0,0026
2,5	0,102	0,0033	0,204	0,0067	0,026	0,002	0,0614	0,002
2,8	0,0812	0,0026	0,162	0,0052	0,021	0,002	0,0489	0,0016
3,0	0,0708	0,0022	0,142	0,0045	0,018	0,002	0,0426	0,0013
3,5	0,0520	0,0016	0,104	0,0031	—	—	0,0313	0,00096
4,0	0,0397	0,0012	0,0794	0,0024	—	—	0,0240	0,00072

Таблица 2.

Данные относительно никелиновой проволоки.

(*Cu* 60, *Ni* 20, *Zn* 20)

Удельное сопротивление . . . . . 0,4 $\frac{\Omega mm^2}{m}$

Температурный коэффициент . 0,00015 $°C^{-1}$

Удельный вес . . . . . 8,98 g/cm^3

Температура плавления . . . . . 1100 °*C*

Диаметр *mm*	Поперечное сечение mm^2	Сопротивл. одного метра при 20° *C* Ω	Вес 100 метров *kg*	Сопротивл. 1 *kg* проволоки Ω	Максимальная нагрузка *A*
0,05	0,00196	205	0,0017	12000000	0,34
0,06	0,00283	140	0,0025	5600000	0,43
0,07	0,00385	104	0,0034	3050000	0,52
0,08	0,00503	80	0,0045	1750000	0,6
0,09	0,00636	63	0,0057	1100000	0,69
0,10	0,00785	51	0,007	730000	0,78
0,11	0,0095	42	0,0085	495000	0,88
0,12	0,0113	35	0,01	350000	0,98
0,14	0,015	26	0,014	188000	1,18
0,16	0,0201	20	0,018	110000	1,38
0,18	0,0254	15,7	0,023	69000	1,59
0,20	0,0314	12,7	0,028	45000	1,8
0,22	0,038	10,5	0,034	30800	2,0
0,25	0,049	8,1	0,044	18500	2,4
0,28	0,0615	6,5	0,054	11800	2,7
0,30	0,0706	5,6	0,063	8950	3,0
0,35	0,096	4,2	0,086	4830	3,6
0,40	0,1256	3,2	0,11	2840	4,2
0,45	0,159	2,5	0,14	1170	4,8
0,50	0,196	2,0	0,175	1160	5,5
0,55	0,238	1,7	0,215	790	6,1
0,60	0,283	1,4	0,255	555	6,8
0,65	0,332	1,2	0,3	400	7,5
0,70	0,385	1,0	0,345	300	8,3
0,80	0,503	0,8	0,45	176	9,7
0,90	0,636	0,62	0,57	110	11,2
1,0	0,785	0,50	0,17	72	12,6
1,1	0,95	0,42	0,85	49	14
1,2	1,13	0,35	1,0	35	15,7
1,4	1,54	0,26	1,4	19	19,2
1,60	2,01	0,2	1,8	11	22,5
1,80	2,54	0,157	2,3	6,9	25,5
2,0	3,14	0,127	2,8	4,5	29
2,20	3,8	0,105	3,4	3,1	32,4
2,50	4,9	0,08	4,4	1,8	38
2,80	6,15	0,065	5,5	1,2	44
3,00	7,05	0,057	6,3	0,9	48
3,50	9,6	0,042	8,6	0,48	58
4,0	12,6	0,032	11	0,28	68

Таблица 3.

Данные относительно константана.

(*Cu 58, Ni 41, Mn 1*).

a. Круглая проволока.

Удельное сопротивление . . . . . 0,50 $\frac{\Omega\, mm^2}{m}$

Температурный коэффициент . . 0,000005 $°C^{-1}$

Удельный вес . . . . . 8,9 g/cm^3

Температура плавления . . . . . 1276 $°C^{-1}$.

Диаметр *mm*	Поперечное сечение mm^2	Сопротивление 1 метра Ω	Вес 1 *m* проволоки *g*	Длина 1 *kg* проволоки в *m*	Максимальн. нагрузка *A*
0,04	0,001256	398	0,011	90909	—
0,05	0,00196	255	0,017	58823	0,34
0,06	0,00283	176	0,025	40000	0 43
0,07	0,00385	130	0,034	29411	0,52
0,08	0,00503	100	0,044	22727	0,6
0,09	0,00636	78,6	0,056	17857	0,69
0,10	0,00785	63,7	0,070	14286	0,78
0,11	0,0095	52,6	0,083	12048	0,88
0,12	0,0113	44,2	0,1	10000	0,98
0,14	0,0154	32 5	0,13	7692	1,18
0,15	0,018	27,1	0,157	6369	1,4
0,16	0,0201	25	0,18	5555	1,38
0,18	0,0254	19,6	0,22	4545	1,59
0,20	0,0314	15,9	0,28	3571	1,8
0,22	0,038	13,16	0,34	2941	2,0
0,25	0,049	10,2	0,43	2326	2,4
0,28	0,0615	8,12	0,54	1852	2,7
0,30	0,0706	7,08	0,62	1613	3,0
0,35	0,096	5,21	0,85	1176	3,6
0,40	0,1256	3,97	1,1	909	4,2
0,45	0,159	3,14	1,39	719	4,8
0,50	0,196	2,545	1,72	581	5,5
0,55	0,238	2,106	2,1	476	6,1
0,60	0,283	1,765	2,5	400	6,8
0,65	0,332	1,510	2,9	345	7,5
0,70	0,385	1,3	3,4	294	8,3
0,80	0,503	0,995	4,4	227	9,7
0,90	0,636	0,787	5,6	179	11,2
1,0	0,785	0,637	6,9	145	12,6
1,1	0,95	0,526	8,4	119	14,0
1,2	1,13	0,442	10	100	15,7
1,4	1,54	0,325	13,60	74	19,2
1,6	2,01	0,249	17,5	57,1	22,5
1,8	2,54	0,196	22,5	44,44	25,5
2,0	3,14	0,159	27	36,04	29
2,20	3,8	0,131	33	30,30	32,4
2,50	4,9	0,102	43	23,25	38
2,80	6,15	0,081	54	18,52	44
3,0	7,05	0,071	62	16,12	48
3,50	9,6	0,052	85	11,76	58
4	12,6	0,0396	110	9,09	68
5	19,6	0,0255	170	5,88	124
6	28,3	0,0176	250	4,0	156

b. Лента.

Удельное сопротивление . . . . . 0,50 $\frac{\Omega\, mm^2}{m}$

Температурный коэффициент . . 0,000005 $°C^{-1}$

Удельный вес . . . . . 8,9 g/cm^3

Температура плавления . . . . . 1276 $°C^{-1}$.

Ширина *mm*	Толщина *mm*	Поперечн. сечение mm^2	Сопротивление 1 метра Ω	Вес одного метра *g*	Длина 1 *kg* ленты *m*	Максимальная нагрузка *A*
3	0,05	0,15	3,27	1,33	752	4,9
	0,1	0,3	1,63	2,67	375	7,4
	0,15	0,45	1,09	4,0	250	9,6
	0,2	0,6	0,817	5,33	188	11,4
	0,3	0,9	0,544	8,0	125	14,6
5	0,05	0,25	1,96	2,22	450	7,2
	0,1	0,5	0,98	4,45	225	11,2
	0,15	0,75	0,654	6,67	150	14,2
	0,2	1,0	0,49	8,89	113	16,9
	0,3	1,5	0,327	13,3	75,2	22,0
	0,4	2,0	0,245	17,8	56,3	26,0
	0,8	4,0	0,123	35,6	28,1	39,0
	1,0	5,0	0,098	44,5	22,5	45,0
10	0,1	1,0	0,49	8,89	113	19,2
	0,2	2,0	0,245	17,8	56,3	29,0
	0,3	3,0	0,163	26,7	75,3	38,0
	0,8	8,0	0,061	71,1	14,1	69,0
	1,0	10,0	0,049	88,9	11,3	78,0
15	0,2	3,0	0,163	26,7	37,5	39,0
	0,3	4,5	0,109	40	25	53,0
	0,4	6,0	0,082	53,3	18,8	62,0
	0,8	12,0	0,0408	107	9,36	94,0
	1,0	15,0	0,0327	133	1,52	108,0
20	0,1	2,0	0,245	17,8	56,3	32,5
	0,2	4,0	0,123	35,6	28,1	50,0
	0,3	6,0	0,0817	53,3	18,8	66,0
	0,4	8,0	0,061	71,1	14,1	78,0
	0,8	16,0	0,0306	142	7,04	117,0
	1,0	20,0	0,0245	178	5,63	134,0

Таблица 4.

Данные относительно нихрома.

(*Ni, Cr, Fe*).

a. Круглая проволока

Удельное сопротивление . . . . . 1,10 $\frac{\Omega\, mm^2}{m}$

Температурный коэффициент при 20° *C* 0,00032 $°C^{-1}$

уменьшается до 0,00017 при 1100° *C*

Удельный вес . . . . . 8,15 g/cm^3

Температура плавления . . . . . 1450—1500° *C*

Продолжительная рабочая температура . 1100° *C*.

Диаметр проволоки *mm*	Поперечное сечение mm^2	Сопротивление 100 *m* в Ω			Вес 100 *m* проволоки *kg*	Сопротивление 1 *kg* проволоки Ω	Максимальная допуст. нагрузка 1
		при 20° *C*	при 600° *C*	при 1000° *C*			
0,05	0,00196	56100	63500	66500	0,0016	35000000	0,32
0,06	0,00283	38800	44000	46000	0,0023	16900000	0,38
0,07	0,00385	28500	32300	33800	0,0031	9200000	0,44
0,08	0,00503	21800	24700	25900	0,0041	5300000	0,5
0,09	0,00636	17200	19500	20500	0,0052	3300000	0,55
0,10	0,00785	14000	15800	16600	0,0064	2180000	0,6
0,11	0,0095	11500	13100	13720	0,0077	1500000	0,69
0,12	0,0113	9700	11000	11530	0,0092	1050000	0,77
0,14	0,0154	7100	8080	8463	0,0125	570000	0,9
0,16	0,0201	5400	6194	6484	0,0163	335000	1,0
0,18	0,0254	4300	4900	5131	0,0207	209000	1,1
0,20	0,0314	3500	3965	4151	0,0255	137300	1,2
0,22	0,038	2900	3277	3430	0,031	93600	1,3
0,25	0,049	2240	2540	2659	0,04	56200	1,45
0,28	0,0615	1780	2024	2119	0,05	35700	1,6
0,30	0,0706	1560	1763	1846	0,0575	27100	1,75
0,35	0,096	1140	1297	1358	0,078	14650	2,2
0,40	0,1256	870	991	1037	0,102	8560	2,6
0,45	0,159	690	783	820	0,13	5340	3,2
0,05	0,196	560	635	665	0,16	3500	3,5
0,55	0,238	460	523	547	0,194	2380	4,0
0,60	0,283	380	440	460	0,23	1677	4,5
0,65	0,332	360	409	428	0,27	1338	5,0
0,70	0,385	280	323	338	0,315	910	5,5
0,80	0,503	210	247	259	0,41	534	6,6
0,90	0,636	170	195	204,7	0,52	333	7,7
1,0	0,785	140	158	166	0,64	219	8,8
1,1	0,95	115	131	137,1	0,775	149	10,0
1,2	1,13	97	110	115,3	0,92	105	11
1,4	1,54	71	81	84,6	1,25	57	14
1,6	2,01	54	62	64,8	1,64	33,3	17
1,8	2,54	43	49	51,3	2,0	20,9	20
2,0	3,14	35	39,6	41,4	2,5	13,6	23
2,2	3,8	29	32,7	34,2	3,1	9,3	26
2,50	4,9	22	25,3	26,5	4,0	5,6	31
2,8	6,15	17,8	20,1	21,1	5	3,55	36
3,0	7,05	15,6	17,6	18,5	5,7	2,70	40
3,50	9,6	11,4	12,9	13,58	7,8	1,46	51
4,0	12,6	8,7	9,87	10,33	10,2	0,85	62

b. Лента

Удельное сопротивление . . . . . 1,10 $\frac{\Omega\, mm^2}{m}$

Температурный коэффициент при 20° C . 0,00032 °C^{-1}
спадает до 0,00017 при 1 100° C

Удельный вес . . . . . 8,15 g/cm^3

Температура плавления . . . . . 1 450 ÷ 1 500° C

Продолжительная рабочая температура . 1 100° C.

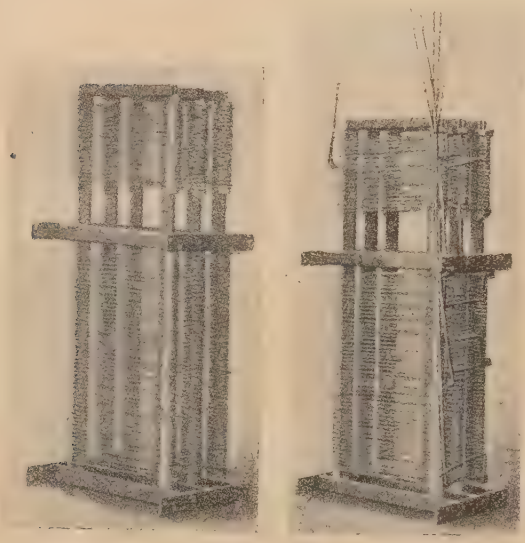
Толщина ленты mm	Ширина ленты mm	Сечение mm^2	Сопротивл. 100 m ленты Ω			Вес 100 m ленты kg	Сопротивл. 1 kg ленты Ω	Максимальн. допустимая нагрузка A
			при 20° C	при 600° C	при 1 000° C			
0,1	2	0.2	550	622	651	0,163	3 374	3,5
0,125	1	0,125	880	996	1 042	0,102	8 644	2,6
0.125	0,5	0.625	1 760	1 992	2 085	0.051	34 570	1,6
0.05	0.5	0.025	4 400	4 980	5 214	0,02	216 750	1.1
0.05	0,4	0.02	5 500	6 226	6 517	0,016	337 400	1,0

Допустимая плотность тока для проволок, завитых в спираль, в предположении достаточно хорошей вентиляции воздуха, при диаметрах проволоки от 0,4 до 3,5 mm, колеблется приблизительно в пределах от 6,0 до 3,0 A/mm^2; для лент толщиной 0,3 mm и шириной от 6 до 22 mm колеблется от 5,5 до 6,0 A/mm^2.

Размеры наиболее употребительных спиралей приведены в табл. 24.

Круглый провод, намотанный на раму, более предпочтителен эластичным спиралям. Сильно натянутая на раму проволока хорошо сопротивляется сотрясениям, при значительных отклонениях от нормального положения, благодаря чему реостаты с такого рода устройством сопротивлений с успехом применяются в установках, где могут иметься толчки (краны и тому подобное). Рама, на которую навертывается проволока, имеет боковые стороны, сделанные из полосового железа, на внешних гранях которого прочно прикреплены, посредством гипса, фарфоровые рифленые полуцилиндры. На фиг. 1 изображен общий вид проволочного рамочного реостата, а на фиг. 2 дано изображение отдельных деталей его в полумонтированном состоянии. Ширина рамы, при диаметрах проволоки до 1,4 mm делается нормально от 150 до 200 mm, а при проволоках диаметром от 1,5 до 3,5 mm — 400 mm. Намотка проволок при $d = 3 \div 3{,}5$ mm требует сильных натяжений, что нужно иметь в виду при проектировании и расчете на механическую прочность рамы, иначе она может оказаться после

намотки погнутой или поведенной. Фарфоровые полуцилиндры на своей поверхности, как правило, должны иметь впадины для проволоки с таким расчетом, чтобы расстояние между ближайшими проволоками. при диаметрах их от 1,5 до 3,5 *mm*, не было менее 8 *mm*.



a *b*

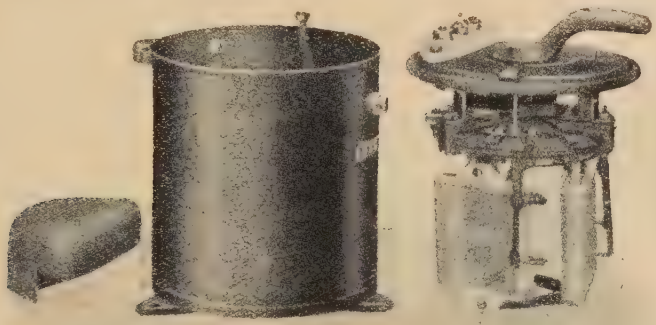
Фиг. 1.

На фиг. 3 представлен общий вид реостата, в котором элементы сопротивлений выполнены из круглой проволоки, намотанной на рамки из огнеупорного материала.

Круглый провод, намотанный на изолирующий стержень. Это устройство особенно рекомендуется для проволок малого диаметра. Изолирующие стержни выполняются из огнеупорного материала (фарфора, стеатита, шифера и т. п.) и снабжаются винтовыми желобками, в которых закладывается проволока. Плотно прилегая к телу стержня, проволока хорошо отдает теплоту ему, что делает выгодным исполь-

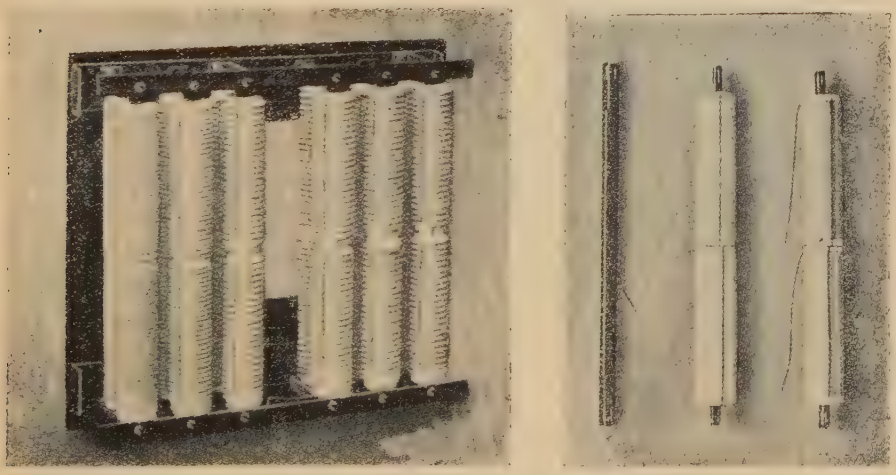
Фиг. 2.

зование таких сопротивлений в случае кратковременных нагрузок. В случае продолжительных нагреваний допускаемые плотности тока при таком устройстве сопротивлений несколько выше, чем у спиральных сопротивлений; так, например, при диаметрах проволоки от 0,3



Фиг. 3.

до 2,0 *mm* плотность тока для никелина, реотана и манганина колеблется приблизительно для средних размеров цилиндра от 13 до 3,3 A/mm^2, где большее значение плотности тока должно соответствовать меньшему диаметру проволоки.

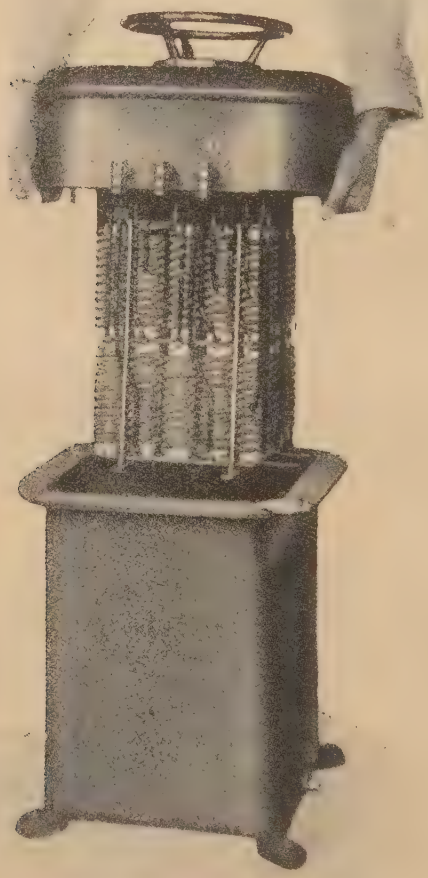


a *b*

Фиг. 4.

Кроме этого, сопротивления из проволоки, навитой на цилиндр из огнеупорного материала, хорошо защищаются, благодаря глубоким впадинам в остове, от соприкосновения с посторонними предметами и от

механических повреждений. На фиг. 4*a* представлен общий вид элементов такого рода сопротивления, а на фиг. 4*b* — отдельные их детали. Из фиг. 4*b* видно, что фарфоровый цилиндр насаживается на металлический стержень, служащий для его закрепления. Стержень имеет фасонный профиль, соответствующий отверстию фарфорового цилиндра. Фасонный профиль сечения стержня и отверстия в цилиндре делается с целью избежания поворачивания цилиндров на нем, после его закрепления на корпусе реостата.



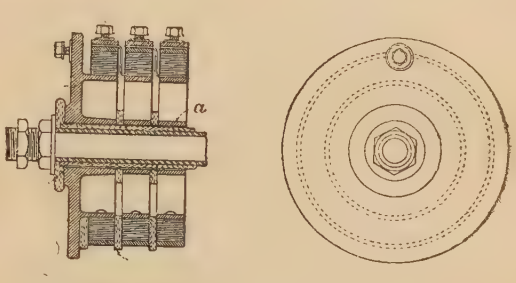
Фиг. 5.

Цилиндры из огнеупорного материала находят себе широкое применение так же в реостатах лабораторного типа со скользящим контактом, в которых применяется более густая намотка проволоки. Так как эти реостаты предназначаются обычно для продолжительных нагрузок, то для получения бо́льшей поверхности охлаждения фарфоровые цилиндры снабжаются широким отверстием, а стенки цилиндров стараются делать по возможности тонкими.

Круглый провод может наматываться на изолирующий стержень не только простой спиралью, а также и сложной; в этом случае из проволоки вначале свивается цилиндрическая спираль небольшого диаметра, а затем эта спираль навивается по винтовой линии на изолирующий стержень. При таком выполнении отдельные элементы сопротивления получаются очень компактными; они занимают небольшой объем, а сама проволока может иметь хорошее соприкосновение с охлаждающей средой.

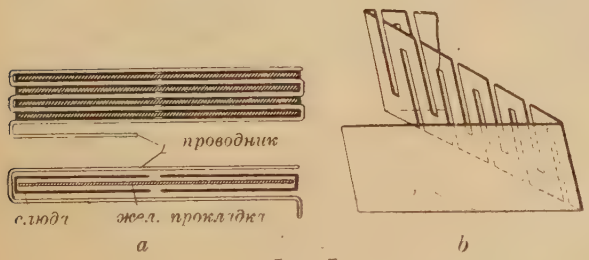
Реостат с элементами сопротивления в виде сложных спиралей изображен на фиг. 5.

Круглый провод с эмалевой изоляцией, намотанный на гладкий изолирующий цилиндр, целесообразно применять для тонких высокоомных сопротивлений. Намотанная проволока покрывается эмалевым лаком. Эмаль хорошо защищает тонкую проволоку против влияния воздуха и изолирует одновременно друг от друга близко, почти вплотную, расположенные проводники. Такой вид устройства элементов сопротивления применяется для проволок диаметром не свыше 0,4 *mm*; обычно же эти сопротивления делаются из проволок очень малых диаметров (до 0,13 *mm*), особенно нуждающихся в защите.



Фиг. 6.

Дисковые катушки применяются в тех случаях, когда желательно получить сопротивление по возможности с большой постоянной времени нагрева. Устройство заключается в следующем: тонкая металлическая лента наматывается в виде плоской спирали (как часовая пружина), а между отдельными витками закладывается сравнительно толстая, железная лента. При этом, чтобы не получалось замыкания, между витками ленты наматывается одновременно тонкая полоска азбеста. Общий вид такого уже собранного устройства представлен на фиг. 6. Для получения большого сопротивления из ленты вырезают, иногда с обеих сторон поочередно, с некоторым сдвигом, прямоугольники, благодаря чему она получает зигзагообразный вид. Посредством применения различной толщины промежуточной железной ленты может быть подобрана различная постоянная времени нагрева. За охлаждающую поверхность таких сопротивлений нужно принимать только внешнюю поверхнось собранной шайбы (фиг. 7), так как спирали при сжатии прилегают друг к другу настолько плотно, что охлаждение посредством конвекции здесь отпадает. Вследствие большой теплоемкости таких сопротивлений и малой охлаждающей поверхности их теплоотдача протекает значительно медленнее, чем у спиралей, подвешенных свободно в воздухе.

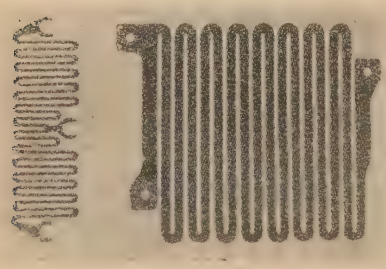


Фиг. 7.

Пакетные сопротивления изготовляются из металлической ленты, в которой вырезают зигзагообразно пазы. Эта лента складывается, как показано на фиг. 7, причем в каждый загиб ленты закладывается железная пластина, изолированная от токопроводящей ленты посредством слюдяных прокладок. На фиг. 7*b* изображена зигзагообразная лента еще в несложенном состоянии; фиг. 7*a* дает поперечный вид сложенного, совершенно готового пакета и показывает, как располагаются лента, железные пластины и слюдяная изоляция. Посредством прорезки в ленте пазов различной высоты и ширины можно изменять ее сопротивление. Это обстоятельство дает большую выгоду в производственном отношении, так как здесь представляется возможным при изготовлении различных сопротивлений пользоваться лентами одной и той же ширины и толщины, варьируя лишь размерами вырезов.

Чугунные сопротивления применяются как для пусковых, так и для регулировочных реостатов с воздушным охлаждением, в случае больших сил тока и, кроме того, там, где нормальная работа установки сопровождается тряской и толчками (транспортирующие установки).

Чугунные сопротивления реостатов составляются из отдельных небольших секций (фиг. 8), имеющих для компактности зигзагообразную форму. С обоих концов секция снабжается отверстиями, сквозь которые пропускаются стяжки (см. фиг. 9). Наиболее распространенный способ закрепления секций состоит в том, что отдельные секции нанизываются на железные стержни, изолированные с поверхности слоем слюды. В случае длинных и тонких секций, во избежание их поломок при толчках, делается в середине секций еще отверстие, сквозь которое также продевается железный стержень, изолированный слоем слюды. На фиг. 10 дан снимок устройства чугунного сопротивления.



Фиг. 8.

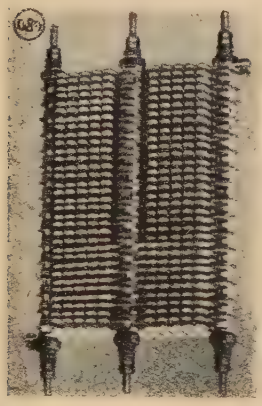
Допустимая нагрузка для чугунных сопротивлений выражается обычно посредством мощности, приходящейся на единицу площади поверхности, причем в расчет принимается поверхность всех секций.

Для чугунных сопротивлений, охлаждаемых воздухом, допустимые нагрузки имеют следующие значения:

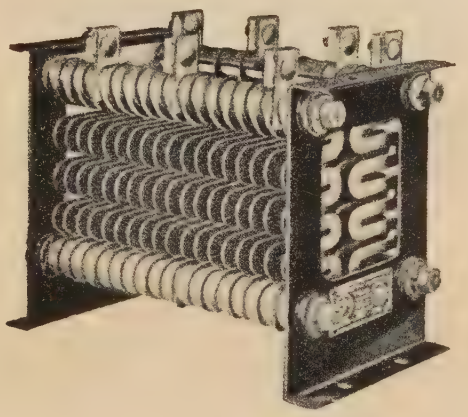
для продолжительного нагрева — 35 $\frac{W}{dm^2}$

для кратковременного нагрева — 470 $\frac{W}{dm^2}$.

Плотность тока при продолжительной нагрузке допускается от 1,2 до 1,8 A/mm^2. Удельное сопротивление чугуна очень высоко и колеблется в среднем от 0,75 до 0,80 $\frac{\Omega mm^2}{m}$. Температурный коэффициент чугунных сопротивлений тоже очень значителен, но при грубых регу-



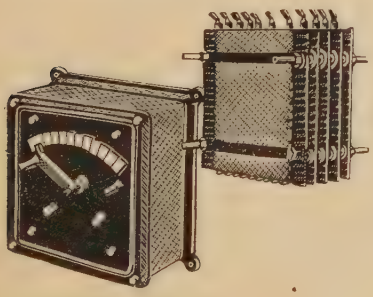
Фиг. 9.



Фиг. 10.

лировках, где обычно применяются чугунные сопротивления, это обстоятельство особого значения не имеет.

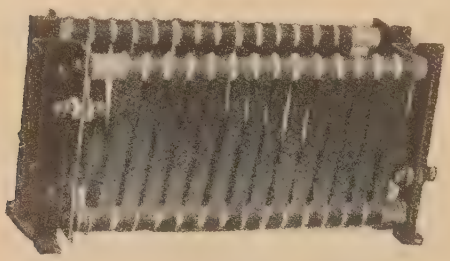
Сетчатые сопротивления.— Сопротивления, выполняемые в виде сетки, применяются для небольших пусковых реостатов, а также для реостатов возбуждения. Самое сопротивление выполняется из круглой проволоки или тонкой металлической ленты, причем из проволоки или ленты делается сетка, укрепляемая своими краями на раме. Для того чтобы избежать соприкосновения между отдельными частями проволоки, между ними закладывается азбестовый шнур. Таким образом сетчатое сопротивление по внешнему виду напоминает материи с полотняным плетением, где за основу взят азбестовый шнур, а утком служит металлическая круглая проволока или лента. Общий вид такого устройства сопротивления изображен на фиг. 11. Элементы таких сопротивлений выполняются в виде рамок, весьма удобных для сборки реостата. При вертикальном расположении рамок сопротивление хорошо вентилируется.



Фиг. 11.

Ленточные сопротивления.— Эти сопротивления изготовляются из металлической ленты, причем сама лента укрепляется в раме так,

что она образует зигзаги. Для увеличения жесткости края ленты между точками крепления загибаются, и поперечное сечение ее образует ⊓-образную форму. Общий вид ленточного сопротивления представлен на фиг. 12, а на фиг. 189 приведен снимок реостата, ленточные сопротивления которого имеют корытообразную форму сечения.



Фиг. 12.

§ 3. Внутренние соединения. — Под внутренними соединениями, или связами, здесь понимаются проводники, служащие для соединений между собою отдельных секций и для приключения к контактам переключателя отдельных ступеней сопротивления реостата. Прикрепление соединительных проводников, в случае чугунных сопротивлений, производится посредством привертывания их к секциям специальными винтами; в проволочных же реостатах присоединение проводников осуществляется обычно при помощи пайки. Если пространство между отдельными секциями сопротивлений в реостате большое, то в качестве соединяющих проводов применяется круглая или полосовая медь в голом (не изолированном) виде. В других случаях применяются медные провода с хлопчатобумажной или азбестовой изоляцией. Иногда для изоляции голого медного провода употребляют стеклянные или фарфоровые бусы, которые нанизываются на провод. Подобная изоляция, однако, требует большой тщательности выполнения, так как бусы часто ломаются или сдвигаются, от чего провода могут касаться, образуя замыкание отдельных секций или общее короткое замыкание реостата.

Применение голых или изолированных круглых соединительных проводов свыше диаметром 8 *mm* (сечением в 50 mm^2) непрактично, во-первых, из-за малой относительной охлаждающей поверхности; во-вторых, из-за затруднений, возникающих при присоединении их к секциям сопротивлений и к контактам переключателя ступеней. В случае необходимости иметь бо́льшие сечения рекомендуется пользоваться двумя или более параллельно соединенными проводами, а при больших токах — полосовой медью, дающей бо́льшую поверхность охлаждения по отношению к поперечному сечению.

Допустимые нагрузки для круглых и полосовых соединительных проводников приведены в таблице 5.

§ 4. Переключатели ступеней (коммутаторы). — Переключатель ступеней служит для того, чтобы иметь возможность включать то или

Таблица 5.

Допустимые нагрузки для медных соединительных проводов.

a. Круглая медная проволока.

Общее сечение *mm*²	Число и диаметр проводов		Допустимая нагрузка для проводов голых, с хлопчатобум. и азбест. изоляц.	
	Число	*mm*	Продолжительная в *A*	Кратковременная в *A*
1,0	1	1,13	13	15
1,5		1,38	17	20
2,5		1,79	24	30
4,0		2,26	32	40
6,0		2,77	42	52
10		3,57	60	76
16		4,52	80	104
25		5,65	110	143
35		6,68	140	187
50		7,98	160	246
2 × 10 = 20	2	3,57	120	152
2 × 16 = 32		4,52	160	208
2 × 25 = 50		5,65	220	286
3 × 25 = 75	3	5,65	330	429
4 × 25 = 100	4	5.65	440	572

b. Полосовая голая медь.

Сечение в *mm*²	Размеры толщина × ширина *mm*	Допустимая нагрузка	
		Продолжительная в *A*	Кратковременная в *A*
60	3 × 20	230	280
80	4 × 20	275	340
100	5 × 20	310	390
120	4 × 30	370	460
160	4 × 40	450	560
200	5 × 40	510	640
250	5 × 50	600	750
300	5 × 60	680	850
360	6 × 60	750	940
420	7 × 60	800	1 020
480	8 × 60	870	1 120

иное число ступеней сопротивления в цепь, обслуживаемую реостатом (якорь, шунт и т. д).

Различают следующие виды переключателей ступеней:

a) плоские,

b) барабанные,

c) вальковые,

d) контакторные.

a. Плоские переключатели. Плоский переключатель состоит обычно из ряда контактов, закрепленных неподвижно в одной плоскости на какой-либо доске или пластине из изоляционного материала, и подвижного скользящего контакта.

Неподвижные контакты плоского переключателя располагаются или по дуге окружности, или прямолинейно, причем прямолинейное расположение применяется обычно в больших реостатах. Подвижной контакт в случае расположения неподвижных контактов по дуге окружности перемещается при помощи рычага, закрепленного на оси реостата и вращаемого либо от руки, либо посредством привода (в больших пусковых реостатах). При прямолинейном размещении неподвижных контактов подвижной контакт перемещается обычно при помощи тросса, цепи или винта по неподвижно закрепленной направляющей.

Прямолинейно-расположенные контакты почти всегда имеют форму прямоугольников. Контакты, расположенные по дуге окружности, для небольших сил тока обычно делаются круглыми, для больших сил тока — трапецевидными. Круглые контакты иногда для умещения бóльшего числа их располагаются в шахматном порядке в два или более концентрических ряда. Ввиду того, что ступени реостата часто рассчитываются на прохождение различных токов, на одном и том же ступенчатом переключателе ставятся иногда контакты, отличающиеся друг от друга по форме и по размерам, но высота контактов, независимо от их размеров и формы, делается одинаковой. Контакты крепятся на досках, причем толщину досок берут по возможности малой (около 10, 20 и 30 *mm*), что дает возможность экономить на материале болтов. В качестве материала для контактных досок чаще всего идут мрамор и шифер. Шифер несколько лучше в обработке, но по своим изоляционным свойствам хуже мрамора и применяется лишь до 250 *V*, мрамор же употребляется до 600 *V*, а в особых случаях — и до 1200 *V*.

Лучшим материалом для контактов является медь. Однако чистая медь на практике применяется лишь в ответственных случаях, обычным же материалом, более дешевым и хорошим в обработке, служит латунь. В некоторых случаях красная медь употребляется в качестве накладок на латунных контактах, прикрепляемых посредством неболь-

ших винтов. Накладки красной меди могут быть заменены в случае износа, что является значительным преимуществом такой конструкции.

С возрастанием нагрузки размеры трапецевидных контактов желательно увеличивать главным образом в радиальном направлении, так как в первый момент включения край контакта должен воспринять на себя весь ток, соответствующий данной ступени реостата.

Допустимые нагрузки для круглых и трапецевидных контактов приведены в таблице 6.

Таблица 6.

Допустимые силы тока для контактов.

Род нагрузки		Круглые контакты			Трапецевидные контакты					
		Диаметр в *mm*			Длина 25 *mm*			Длина 35 *mm*		
					Средняя ширина в *mm*			Средняя ширина в *mm*		
		8	10	12	8	12	22	8	12	22
Силы тока в А	Продолжит.	20	30	45	45	60	90	60	90	120
	Кратковрем.	35	50	75	75	100	150	100	150	200

С той стороны контактного ряда, которой соответствует наибольшее сопротивление реостата, рядом с первым контактом на контактной доске прикрепляется также колодка из изоляционного материала, причем высота этой колодки делается такой же, как и у рабочих контактов.

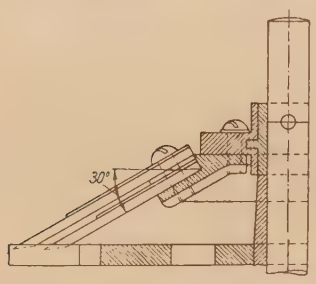
Назначение колодки состоит в том, чтобы поддерживать подвижной контакт, когда он сходит с контактного ряда, в той же плоскости и изолировать его от неподвижных контактов. Материалом для них может служить, например при круглых колодках, глазурованный фарфор, при трапецевидных и прямоугольных — специальные сорта просаленного камня и иногда применяется фибра.

Подвижной контакт, скользящий по неподвижным, выполняется или в виде сплошного куска латуни (только для малых пусковых реостатов), или в виде набора отдельных пластин. Подвод тока к подвижному контакту производится при помощи специальной щетки, скользящей по токопроводящему кольцу, расположенному концентрично контактному ряду. Оси подвижных контактов в настоящее время не допускаются для подвода тока. В прямолинейно расположенных контактных рядах подвод тока производится при помощи шины, идущей параллельно

контактному ряду, и скользящей по ней щетки; токопроводящие направляющие также не допускаются.

При сплошных подвижных контактах применяют просто латунную колодку, прижимающуюся к неподвижным контактам посредством пружины; удельное нажатие устанавливается при этом приблизительно в 0,5 kg/cm^2, а плотность тока допускается около 0,1 A/mm^2.

Большие контактные поверхности требуют уже расслоения подвижного контакта на отдельные пружинящие пластины, так как сплошной контакт в действительности не может прилегать всей поверхностью. Такие пластинчатые щетки привертываются (к рычагу реостата) под углом $\alpha \leqq 30°$ к контактной плоскости. При нажатом состоянии этот угол несколько уменьшается,— приблизительно до 25° (фиг. 13); при таком устройстве пластинки довольно хорошо прижимаются к поверхности контактов. Очевидно, что при угле $\alpha = 30°$ площадь поверхности соприкосновения, получается вдвое большей нежели площадь поперечного сечения щетки. В таблице 7 приведены допустимые значения плотности тока в плоскости соприкосновения и в сечении самой щетки для слоистых подвижных контактов при продолжительной нагрузке.



Фиг. 13.

Таблица 7.

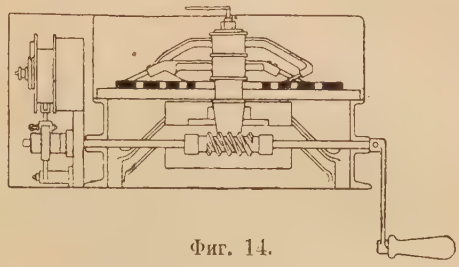
Допустимые значения плотности тока для слоистых подвижных контактов.

Ширина щетки в *mm*		10	15	20	25	30	35
Плотность тока в A/mm^2	в месте контакта	0,67	0,55	0,50	0,47	0,45	0,37
	в щетке	1,34	1,10	1,00	0,94	0,90	0,74

Как видно из приведенной таблицы, допустимая плотность тока с увеличением ширины щетки значительно падает.

На фиг. 14, 15, 24, 35, 36 и др. видны устройства плоских переключателей, в которых неподвижные контакты расположены по дуге окружности; на фиг. 15 представлен вид переключателя с прямолинейным размещением контактов.

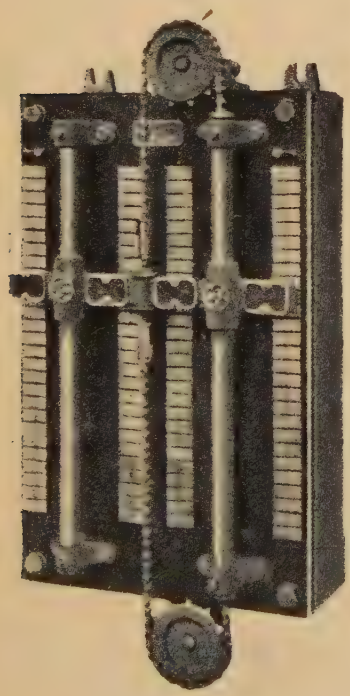
При больших силах тока неподвижные и подвижной контакты обгорают вследствие искрения при включении или выключении каждой ступени. Во избежание этого подвижные контакты пусковых реостатов снабжаются дополнительными щетками, которые следуют несколько впереди по дополнительному ряду контактов, соединенных с основными. Однако это устройство не вполне удовлетворительно, так как при неблагоприятном положении через дополнительный подвижной контакт может долгое время проходить большая сила тока, на которую он не рассчитан.



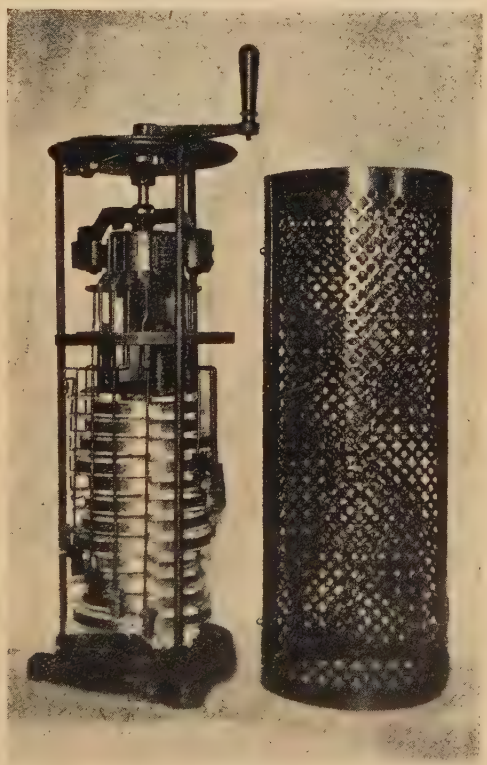
Фиг. 14.

По этой причине подобное устройство вытесняется в настоящее время магнитными искрогасителями, устанавливающимися рядом с подвижным контактом и перемещающимися вместе с рычагом реостата (см. фиг. 14).

b. Барабанный переключатель. Устройство барабанных переклю-



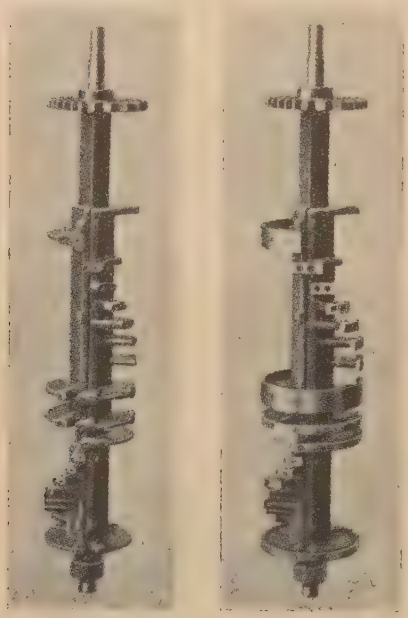
Фиг. 15.



Фиг. 16.

чателей характеризуется тем, что неподвижные контакты образуют цилиндр, по поверхности которого может перемещаться подвижной контакт. По своему внешнему виду неподвижные контакты барабанного переключателя напоминают устройство коллектора; на фиг. 16 представлен снимок реостата, снабженного барабанным переключателем; элементы сопротивления этого реостата выполнены в виде дисков из ленточного провода. Подвижные контакты в барабанных переключателях выполняются обычно из листовой меди или латуни.

c. Вальковый переключатель. Предыдущие описанные типы ступенчатых переключателей, однако, хороши только для редких пользований реостатом. При частых же пусках (до 20 в час) контакты такого переключателя, несмотря ни на какие меры, быстро изнашиваются. Предпочитают поэтому при частых повторных действиях реостата вместо плоских вальковые ступенчатые переключатели, или так называемые контроллеры. Переключатели валькового типа находят себе широкое применение в пуско-регулирующих реостатах для трамвайных и крановых двигателей. Вальковый переключатель иногда помещается под общим кожухом с реостатом, т. е. представляет с ним одно общее целое; чаще, однако, контроллер выносится в виде отдельного аппарата и соединяется с сопротивлениями реостата посредством кабеля. Последнее устройство применяется главным образом в транспортирующих установках, где нежелательно, в связи с экономией места, загромождать постов управления. Вальковый переключатель состоит из вала, обычно квадратного сечения, плотно обтянутого изоляцией из мягкого миканита, с насаженными на него сегментами различной формы, отлитых из латуни и свинченных из двух половин: верхний ряд сегментов обычно образует ходовой барабан, нижний — тормозной.



a *b*

Фиг. 17.

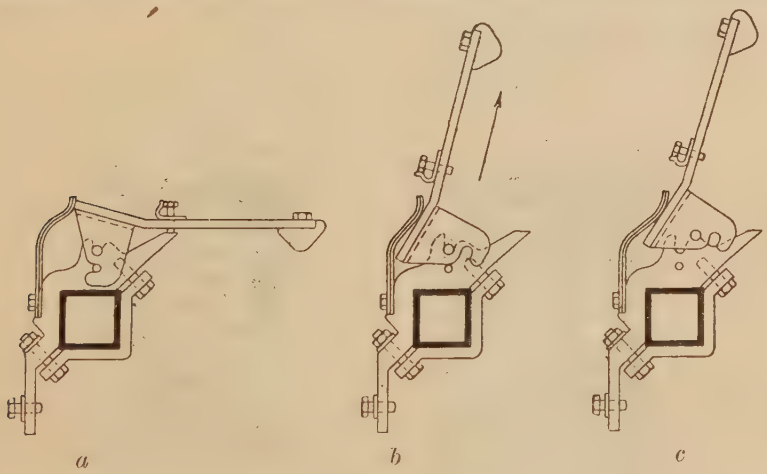
К сегментам привертываются различной формы контактные секторы, вырезанные из труб твердотянутой меди. Фиг. 17 *a* изображает общий вид такого контактного валика без секторов, а фиг. 17 *b* пока-

зывает тот же валик с привернутыми секторами. Другая основная часть валькового переключателя — это неподвижные контакты; они выполняются в виде пружинящих молотков (фиг. 17 *c*), снабженных в месте соприкосновения накладками из меди, которые могут быть заменены всегда в случае их износа. Каждый контактный молоток

Фиг. 17 *c*.

имеет зажимную скобу для закрепления его на общем неподвижном квадратном изолированном стержне и зажим для соединительных проводов. Валек переключателя поворачивается посредством съемной рукоятки.

Для удобства осмотра контактной поверхности и замены пальцев неподвижные контакты имеют устройство, позволяющее быстро осуще-

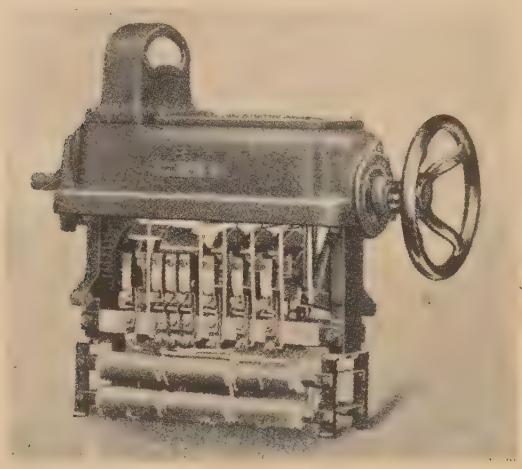


Фиг. 18.

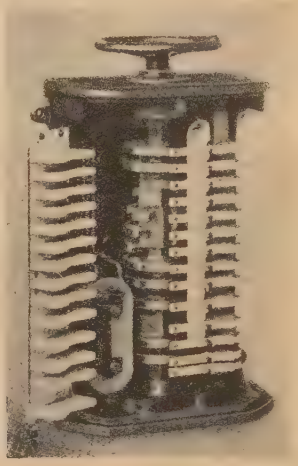
ствлять съемку контактов. На фиг. 18 приведено одно из таких устройств. Фиг. 18 *a* дает изображение нормального рабочего положения неподвижного контакта, а фиг. 18 *b* и *c* показывают положение пальца во время съемки.

На фиг. 19 представлен снимок пускового реостата с вальковым переключателем.

Для получения резкости переключений с одного контакта на другой переключающий механизм снабжается, кроме того, сильной пружиной. Однако, несмотря на это, приходится для уменьшения искры

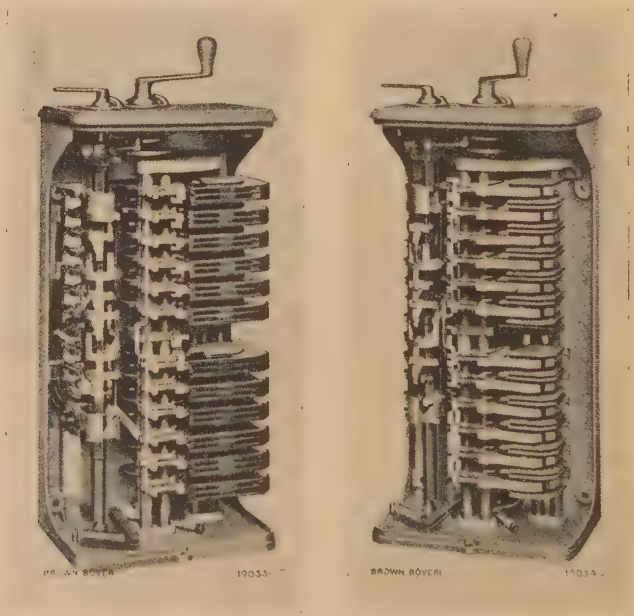


Фиг. 19.



Фиг. 20 *a*.

при разрыве контактов прибегать еще к помощи магнитных искрогасителей. Для предотвращения возникновения между соседними



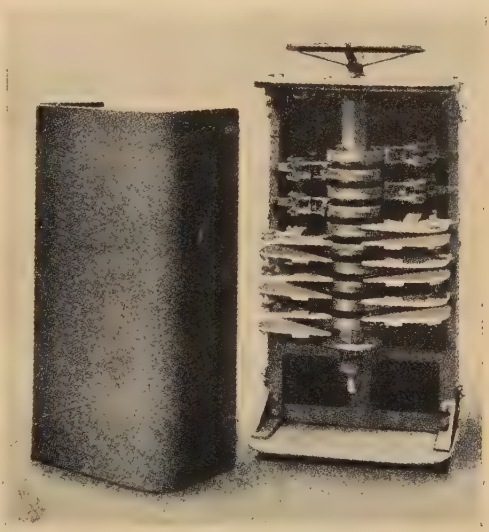
b *c*

Фиг. 20.

контактами перекрывающей дуги, ведущей к короткому замыканию ступеней реостата и разрушению контактов, ставятся промежуточные изоляционные перегородки, смонтированные на общей доске, как это видно из фиг. 20 *a*, *b* и *c*.

Остов контроллера обычно отливается из чугуна и образует жесткую систему в виде верхней и нижней плит, связанных между собою задней стенкой. Спереди и с боков контроллер снабжается защитным кожухом из листового железа; причем передняя часть кожуха выполняется в виде съемной крышки для удобства осмотра контактов.

d. Контакторный переключатель. В особенно тяжелых условиях работы двигателей, т. е. когда она сопровождается частыми пусками и остановками двигателя в течение круглых суток, как, например, в установках горных предприятий, заводских, портовых и др. кранах, в подъемных машинах и пр., предпочтительнее применять в пуско-регулирующих реостатах переключатели ступеней контакторного типа.



Фиг. 21.

Наиболее распространенный тип контакторного переключателя с ручным управлением представлен на фиг. 21. Как видно из фиг. 21, чугунная рама с защитным кожухом, состоящим из задней и передней половины, образуют внутреннее замкнутое помещение переключателя.

Особенностью этой конструкции является то, что выключение и включение отдельных ступеней реостата производится при помощи отдельных для каждой ступени замыкателей.

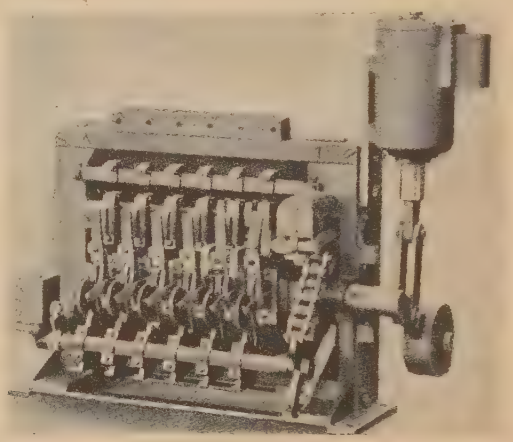
Каждый замыкатель состоит из двух контактов — неподвижного и подвижного. Неподвижный контакт имеет накладку из красной меди (фиг. 22), которая может быть легко заменена в случае износа. Подвижной контакт имеет вид молотка, вращающегося на шарнире, и снабжен также легко-сменной медной накладкой. В нижней части, как видно из фиг. 22, подвижной контакт имеет рычаг с роликом на конце, который опирается на направляющее кольцо, сидящее на общем валу с колесом управления.

Направляющее кольцо выполняется таким образом, чтобы размыкание или замыкание контактов происходило по возможности быстро. Кроме этого важно, чтобы при замыкании или размыкании контакты соприкасались своей поверхностью одновременно. При таком устройстве главная выгода этой конструкции переключателя состоит в том, что изнашиваемость контактов получается незначительной, благодаря участию при разрыве или замыкании всей активной поверхности контактов, а не края контакта, как это имеет место в плоских и вальковых переключателях.

Для повышения срока службы контактов замыкатели контакторов снабжаются, кроме того, еще магнитными искрогасителями, как это видно из фиг. 22.

Кроме описанного контактора с ручным управлением применяются часто контакторы с автоматическим управлением, при помощи электромагнитов или электродвигателя. На фиг. 23 изображен контактор с приводом от электромагнита.

Фиг. 22.



Фиг. 23.

§ 5. Зажимы для внешних проводов и устройство выводов. Для приключения к какому-либо источнику тока пусковой или регулирующий реостат снабжается специальными выводами. Выводы могут быть сделаны на коммутаторной или контактной доске при помощи сквозных болтов, имеющих с обеих сторон гайки и шайбы для закрепления как самого болта на доске, так и приключения внутренних и внешних проводов; причем для этих целей должны быть отдельные гайки. Чтобы сильно не ослаблять сечения болтов, они снабжаются обычно газовой нарезкой.

Допустимые нагрузки для зажимных выводных болтов приведены в таблице 8.

Таблица 8.

Допустимые нагрузки для зажимных болтов.

Материал		Латунь			Медь		
Диаметр болтов в *mm*		4,5	6	8	10	14	20
Допуст. сила тока в А	Продолжит. нагрузка	25	60	100	200	350	600
	Кратковрем. нагрузка	35	85	140	280	500	850

В зависимости от устройства различают следующие типы выводов:

1) приспособленные для присоединения к ним проводки, выполненной из изолированных проводов, проложенных в изоляционных трубках или без них;

2) приспособленные для присоединения к ним проводки, проложенной в стальных или газовых трубках;

3) приспособленные для присоединения к ним освинцованных кабелей.

Выводные зажимы должны иметь соответствующие обозначения.

§ 6. Предохранительные приспособления для пусковых реостатов. — Автоматические приспособления для предохранения установки от повреждений часто устанавливаются вместе с пусковым реостатом и представляют, таким образом, одну из его деталей. Наиболее распространенными из них являются такие, действие которых рассчитано на случаи:

1) когда напряжение сети внезапно спадает или совсем исчезает;

2) когда двигатель чрезмерно перегружается.

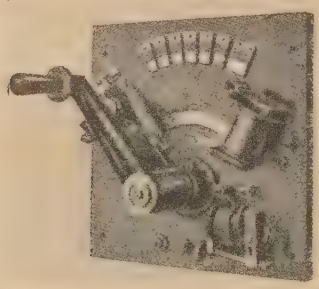
Автоматические приспособления для этой цели обычно устанавливаются на доске ступенчатого переключателя и представляют собой обыкновенные электромагнитные релэ. Один электромагнит этого релэ предназначается для действия на случай снижения напряжения в сети, другой — на случай возрастания тока выше допустимых пределов.

При наступлении в установке указанных выше явлений действие автоматического приспособления обычно сводится к тому, чтобы рычаг реостата из крайнего положения поставить в начальное положение, т. е. положение, соответствующее или максимальному сопротивлению, или полному выключению цепи тока.

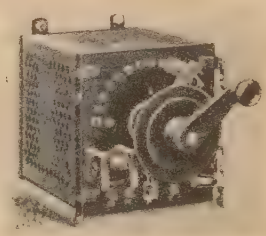
Электромагнитные автоматы действуют на рычаг реостата в большинстве случаев не непосредственно, а при помощи пружины,

закрепленной одним концом на корпусе реостата или коммутаторной доске, другим — к оси рычага таким образом, что при крайнем положении рычага пружина должна находиться в напряженном состоянии, т. е. в таком, при котором она способна свободно перевести рычаг реостата в положение максимального сопротивления или обрыва цепи тока, если его ничто не удерживает. В рабочем состоянии, т. е. при выведенном реостате, рычаг удерживается в покое при помощи собачки или ленточного тормоза. В случае перегрузки или понижения напряжения сети электромагнит отпускает, тем или иным образом, тормоз или собачку и тем самым дает возможность действовать пружине на рычаг реостата.

Примерное размещение автоматического приспособления на реостате приведено на фиг. 24 *a*; здесь один из электромагнитов, сериесный,



Фиг. 24 *a*.



Фиг. 24 *b*.

включен последовательно в цепь тока якоря — сериесный; другой, шунтовой, — параллельно к сети. В этом устройстве непосредственно действует на собачку только шунтовой электромагнит; сериесный же электромагнит во время действия замыкает накоротко первый, благодаря чему собачка отпадает, так как ток по обмотке шунтового электромагнита уже не течет, и рычаг реостата отбрасывается в начальное положение.

На фиг. 24 *b* приведен снимок пускового реостата, в котором контактный рычаг задерживается в крайнем положении при помощи сериесного магнита; присоединяя параллельно к обмотке электромагнита ключ, можно посредством замыкания его производить управление реостатом (выключение) с расстояния.

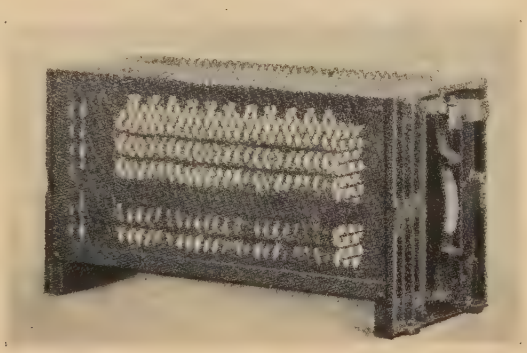
Более подробное описание схем и принципов действия автоматических приспособлений дано ниже (стр. 60).

§ 7. Остов и кожух. — Для того, чтобы реостат представлял собою жесткую систему, он должен иметь остов, к которому прикрепляются отдельные детали реостата, как то: элементы сопротивления,

доска ступенчатого переключателя, кожух, крышка и т. д. Остов, в зависимости от размеров реостата, способа охлаждения и того или иного вида устройства элементов сопротивления, получает различные конструктивные выполнения. Материалом для остова служит обычно полосовое или угловое железо, а также чугун. Остов реостата всегда должен быть так построен, чтобы мраморная или шиферная доска не несла никаких скрепляющих функций.

Для предохранения элементов сопротивлений и внутренних соединений от внешних повреждений и засорений реостат, как правило, должен иметь кожух. Кожух в зависимости от рода охлаждения реостата, от места расположения его, характера помещения и способа защиты делается решетчатым или сплошным. У реостатов с воздушным охлаждением желательно делать решетчатые кожухи для лучшей вентиляции реостата, но это не всегда бывает допустимо из-за возможности попадания внутрь реостата

Фиг. 25.



Фиг. 26.

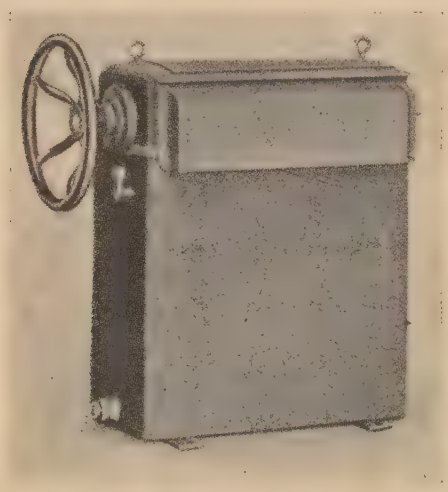
каких-либо частиц, например: металлических опилок, стружек, большого количества пыли и пр. Иногда для лучшего охлаждения боковые стороны кожухов выполняются из металлической проволочной сетки. У реостатов с масляным охлаждением кожухи всегда делаются из сплошного листового железа. Как правило, кожухи должны выполняться из огнеупорного материала и быть достаточно механически прочными.

Для предохранения контактов ступенчатого переключателя реостаты часто снабжаются крышками, имеющими отверстие для вывода наружу оси подвижного контакта; на крышке обычно помещается стрелка, указывающая направление вращения рычага реостата для пуска или регулировки возбуждения. На фиг. 20 и 21 пред-

ставлены общие виды кожуха и остова пускового реостата с вальковым и контакторным переключателем ступеней, а на фиг. 26 — кожух и остов чугунного сопротивления от валькового пуско-регулирующего реостата трамвайного типа.

На фиг. 11, 16 и 25 показывают устройство остовов и кожухов реостатов с воздушным охлаждением. Фиг. 3, 5, 19 и 27 дают представление об устройстве кожухов для реостатов с масляным заполнением.

Кожухи для масляных реостатов должны быть снабжены отверстиями с пробкой для спуска масла. Кроме того кожухи этих реостатов необходимо снабжать устройствами, при помощи которых можно определять, стоит ли масло на нормальном уровне.



Фиг. 27.

Кожухи должны иметь такие размеры, чтобы после заливки маслом сопротивления и обмотки лежали ниже уровня по крайней мере на 2—3 *cm* (при температуре масла в 20°*C*). Если места разрывов контактов лежат в масле, то они должны быть так глубоко погружены, чтобы при выключении самой большой рабочей мощности на поверхности масла не получилось никаких вспышек.

При выполнении остова и кожуха необходимо обращать внимание на то, чтобы все доступные прикосновению металлические части, не находящиеся под напряжением, были надежно соединены электрически между собой и имели общий зажим для соединения с землей. Зажимы для заземления должны выполняться из нержавеющих материалов, например, из латуни. Диаметр болтов заземляющих зажимов должен быть для малых реостатов не менее 6 *mm*, а для реостатов на силы тока не свыше 600 *A* — не менее 12 *mm*. Места для присоединения заземляющих проводников должны иметь соответствующие обозначения.

По способу защиты, т. е. устройству кожухов, крышек и вводов, различают следующие виды реостатов:

1. Открытый. — Этот вид реостатов не имеет или совершенно никакого прикрытия, или снабжается кожухами с очень большими отверстиями так, что части реостата, находящиеся под напряжением,

не ограждены от свободного соприкосновения с посторонними предметами.

2. *Защищенный.* — Реостаты в этом случае снабжаются кожухом (например, из решетчатого железа), имеющим отверстия для выводов и для циркуляции охлаждающего воздуха. Свободное соприкосновение с частями реостата, находящимися под напряжением, в этом случае затруднительно.

3. *Закрытый.* — В этом случае реостаты снабжаются закрытием без отверстий так, что соприкосновение с токоведущими частями и проникновение внутрь реостата посторонних тел затруднительно. Полная защита от пыли, влажности или газа, содержащихся в воздухе, не достигается.

4. *Полугерметический.* В реостатах этого вида кожухи делаются без всяких отверстий. Соприкосновение с токоведущими частями, проникновение пыли и воды затруднено. Полная герметичность здесь не преследуется в целях возможности выравнивания внутренних давлений при изменениях температуры.

5. *С масляной защитой.* Все части, находящиеся под напряжением, а также и выводные зажимы, помещаются в масле. Это предохраняет металлические части против действия водяных паров и газов. Кожух для масла должен быть закрытым.

6. *Безопасные от взрыва.* Для достижения безопасности в отношении взрыва реостаты выполняются:

a) с масляной защитой, при достаточной высоте уровне масла;

b) с герметически закрытым кожухом, выдерживающим большое давление;

c) с закрытым кожухом, имеющим защиту из металлических пластинок.

§ 8. Охлаждение металлических реостатов. — Электрическая энергия, поглощаемая сопротивлениями реостата, обращается вся в тепловую. Часть этой тепловой энергии рассеивается в окружающее пространство посредством излучения, теплопроводности и конвекции, другая часть идет на повышение температуры реостата. Количество рассеянной энергии зависит от условий охлаждения и температуры окружающей среды, что нужно иметь в виду при выборе и расчете сопротивлений реостата.

Следовательно, применяя ту или иную систему охлаждения (воздушное, масляное и пр.), можно получить желаемое соотношение между теплотой, рассеиваемой и поглощаемой сопротивлениями реостата.

Различают следующие виды охлаждения металлических реостатов:

a) воздушное охлаждение;

b) масляное охлаждение;

1) с естественным отводом тепла,

2) с водяным охлаждением масла,

c) песочное охлаждение.

a. Воздушное охлаждение При воздушном охлаждении реостат должен быть так устроен, чтобы элементы сопротивлений могли свободно обтекаться воздухом. Для этой цели в условиях естественного охлаждения кожух реостата снабжают отверстиями, благодаря чему может всегда происходить обмен между нагретым и холодным воздухом. Кроме того элементы сопротивления должны при этом отстоять друг от друга на достаточном расстоянии. Однако для мощных реостатов естественное воздушное охлаждение может быть недостаточным; помимо этого, условия эксплоатации реостата иногда не позволяют применять решетчатых кожухов, вследствие чего приходится прибегать к искусственному воздушному охлаждению при помощи вентиляторов. Искусственное охлаждение находит широкое применение там, где сопротивления реостата подвергаются действию продолжительных нагрузок, например: у нагрузочных или мощных регулирующих реостатов.

В больших реостатах кожухи часто устраиваются продолговатой формы из сплошного листового железа в виде трубы, вследствие чего образуется хорошая тяга воздуха, вызывающая усиленную циркуляцию охлаждающей среды.

Максимальный нагрев реостата над температурой окружающей среды, т. е. повышение температуры должно быть не выше 175° *C* в месте выхода горячего воздуха. При этом повышение температуры кожуха в самом нагретом месте его не должно превосходить 125° *C* и контактов ступенчатого переключателя — не свыше 40° *C*. Для массивных контактов превышение температуры допускается до 60° *C*.

b. Масляное охлаждение. — Реостаты, в которых элементы сопротивлений охлаждаются непосредственно воздухом, обычно обладают малой теплоемкостью; вследствие этого реостаты с воздушным охлаждением быстро нагреваются под действием тока и воспринимают на себя сравнительно небольшое количество энергии. Это обстоятельство невыгодно отражается на конструкции и размерах реостата в тех случаях, когда реостат подвергается кратковременным нагрузкам, за период действия которых теплоотдача в окружающую среду не может проявить себя в достаточной мере. В последних случаях приходится искусственно увеличивать теплоемкость реостата. Увеличение теплоемкости реостата может быть достигнуто посредством погружения сопротивлений в масло. При этом сопротивления реостата, находясь в непосредственном соприкосновении с маслом, легко отдают ему раз-

вивающуюся в них теплоту. Имея большую теплоемкость, масляные реостаты, однако, получаются более компактными, нежели воздушные при той же поглощаемой мощности.

Недостатком масляных реостатов является, однако, то, что они требуют продолжительных пауз между отдельными пусками в ход двигателя для охлаждения масла до начальной температуры.

Объем масла и система охлаждения такого рода реостата выбираются с тем расчетом, чтобы повышение температуры его в наиболее нагретом месте не превосходило 80° *C*.

1. Масляные реостаты с естественным отводом тепла. — В этом случае нагретое масло отдает свою теплоту через посредство внешней охлаждающей поверхности реостата. Период времени, потребный для того, чтобы масло у реостата при этом охладилось до своей начальной температуры, обычно бывает очень велик и достигает в больших пусковых реостатах десяти и более часов, вследствие чего масляные реостаты с естественным отводом тепла применяются лишь для редких пусков в ход (около 1—2 раз в день).

В таблице 9 приведены данные, показывающие, как зависят время охлаждения реостата и постоянная времени нагрева от размеров реостата.

Таблица 9.

Некоторые данные масляных реостатов с естественным отводом тепла.

Пусковая мощность в *kW*	Объем масла в *l*	Время охлажд. с 80° *C* до 30° *C* в часах	Постоянная времени нагрева в часах
7,5	4,5	2,5	0,65
22	12	3,25	1,25
50	24	4	1,25
74	55	5,25	1,5
110	115	7,5	2,25
185	210	11	3,5

2. Масляные реостаты с водяным охлаждением. — В больших реостатах от 600 до 1 000 *kW*, чтобы, с одной стороны, сократить время охлаждения масла, с другой — уменьшить размеры самого реостата, применяется водяное охлаждение; для этой цели реостаты снабжаются специальными охлаждающими устройствами, так называемыми охладителями. Охладитель представляет собою полый цилиндр, внутри которого помещаются охлаждающие трубы для воды (фиг. 28).

В бак охладителя посредством центробежного насоса подается из реостата масло, где оно часть своей теплоты отдает протекающей по трубам воде.

Такие охладители, присоединенные к масляным реостатам, позволяют значительно сократить время охлаждения, например, до 5 минут, а в малых реостатах — до еще меньшей величины. Вообще период охлаждения можно варьировать для каждого реостата по мере надобности, применяя охладители различного размера, или же при помощи того же охладителя путем изменения скорости протекания охлаждающей воды.

Фиг. 28.

Некоторые данные охладителей масляных реостатов представлены в таблице 10.

c. Песочное охлаждение. — Песочное охлаждение применяется, главным образом, в пусковых реостатах, предназначенных исключительно для редкого пуска в ход двигателей.

Для охлаждения применяется только сухой и чистый кварцевый песок, которым должна быть хорошо покрыта поверхность элементов сопротивления и заполнены все промежутки между частями сопротивлений. Обыкновенный речной песок и т. п. не пригоден для целей охлаждения металлических реостатов, так как он весьма восприимчив к влаге и склонен к образованию комков.

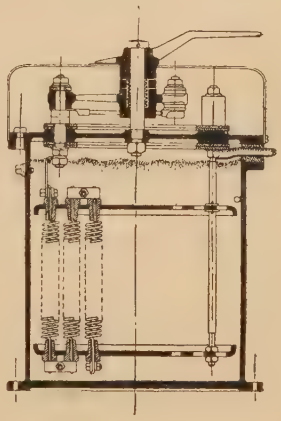
Таблица 10.

Данные охладителей для масляных реостатов.

Отводимая мощность в kW	Охлаждающая поверхность в m^2	Подводимое количество воды при ее темп. 15 — 20° C l/min	Объем масла, помещающ. в охладителе l	Вес охладителя без масла kg
25	5	37	140	235
50	10	75	260	470
100	20	150	370	760
150	30	225	580	1 115
200	40	300	900	1 410
250	50	370	1 080	1 570
300	60	450	1 500	1 900

На фиг. 29 представлен эскиз устройства реостата с песочным охлаждением. Как видно из фиг. 29, песком заполнено все пространство внутри кожуха, где расположены элементы сопротивления. Контактный плоский переключатель располагается на крышке, плотно закрывающей кожух реостата и не позволяющей частицам песка проникать на поверхность контактов, находящихся в воздухе. Присоединение проводов к реостату производится посредством отростков проводников, заделанных в кожухе реостата.

Достоинствами реостатов с песочным охлаждением являются дешевизна, простота обслуживания, бозопасность в пожарном отношении и удобство. Реостаты с песочным охлаждением находят широкое распространение в подвижных электрических установках, где применение реостатов с масляным охлаждением невозможно. Реостаты с песочным охлаждением рекомендуется применять в электрических сельскохозяйственных установках. Обычно в сельских установках реостаты с воздушным охлаждением быстро запыливаются и вследствие этого создают возможность воспламенения.



Фиг. 29.

Реостаты с песочным охлаждением доставляются заводами в совершенно готовом для употребления виде и в дальнейшем почти никогда не требуют смены песка.

Песочные реостаты рассчитываются таким образом, чтобы максимальное повышение температуры песка между двумя элементами не превышало 150° C.

§ 9. Управление металлическими реостатами. — Для пусковых и регулирующих реостатов различают следующие способы управления:

a) управление от руки может быть

1) непосредственное,

2) посредством привода и штанг.

Управление реостатами посредством привода или штанг применяется в тех случаях, когда несколько аппаратов должны действовать от одного общего управляющего рычага, или когда реостаты по своему устройству, расположению и размерам должны быть удалены на значительные расстояния от места управления;

b) электрическое управление выполняется тогда, когда требуется, чтобы:

1) процесс произвольно мог быть начат и произвольно приостановлен от руки,

2) процесс мог быть начат от руки и проведен автоматически (кнопочная система),

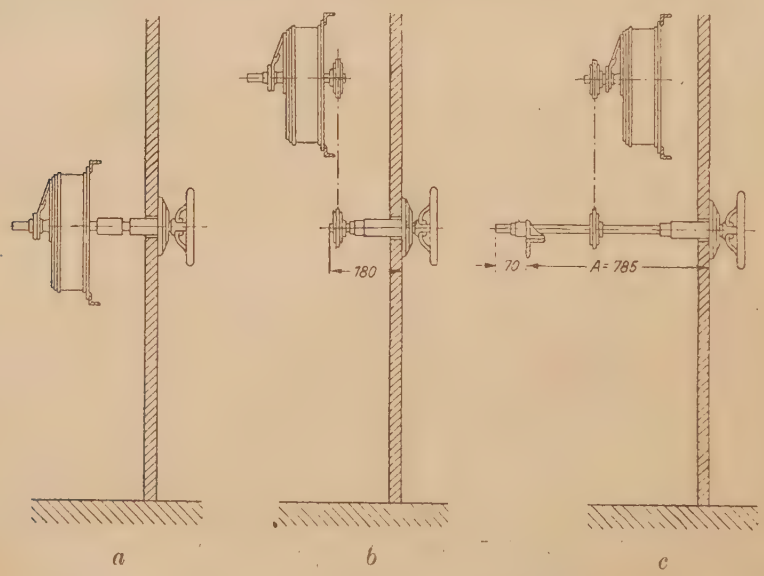
3) процесс начинался и проходил полностью автоматически.

Электрическое управление применяется также и в тех случаях, когда, например, механическое соединение между органами управления и аппаратами получается слишком громоздким и неудобным, в больших пусковых реостатах, где требуются большие усилия для перемещения рычага, при пусках, осуществляющихся по строго определенному закону, и т. п.

Фиг. 30.

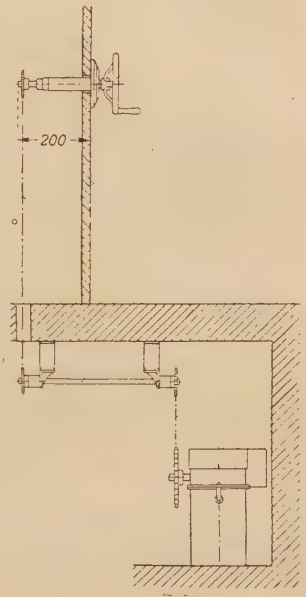
Простейшее устройство ручного непосредственного управления пусковых и регулирующих реостатов представлено на фиг. 30, оно состоит из розетки, привертываемой к распределительному щиту, и вала с сидящим на нем с передней стороны колесом управления (маховичком). Вал маховичка сцепляется с валом контактного переключателя реостата обычно посредством муфты (фиг. 31 *a*).

Фиг 31 *b* показывает управление реостатом при помощи цепной передачи. В случае больших удалений реостата от распределительного щита приходится пользоваться более длинным валом (фиг. 31 *c*), вследствие чего необходимо уже ставить вторую опору позади щита. Для удобства осматривания контактов рекомендуется всегда устанавливать реостат позади щита так, как это показано на фиг. 31.



Фиг. 31.

При управлении большими пусковыми реостатами ручным способом, ввиду больших усилий, потребных для передвижения рычага с подвижным контактом, делается передача от колеса управления к валу подвижного контакта с передаточным числом, бо́льшим единицы. Тогда для перемещения подвижного контакта в крайнее положение приходится делать несколько оборотов колеса управления; для удобства и более равномерного вращения колесо снабжается рукояткой.



Фиг 32.

Ручное управление реостатом посредством передаточного механизма, применяющееся в случае расположения реостата на большом расстоянии от распределительного щита, представлено на фиг. 32. Здесь, как видно из фиг. 32, передача производится частью при помощи цепи, частью посредством вала. Иногда для передачи на большие расстояния управления реостатом употребляются тонкие проволочные канаты, тросы, заложенные в железные трубы, причем там, где трос делает повороты, ставятся опорные или направляющие ролики.

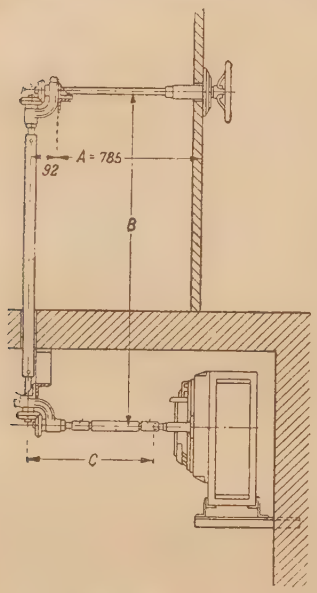
Если валы механизмов управления образуют прямые углы, то в местах образования углов ставят конические шестерни и специальные угловые подшипники (фиг. 33).

Фиг. 33.

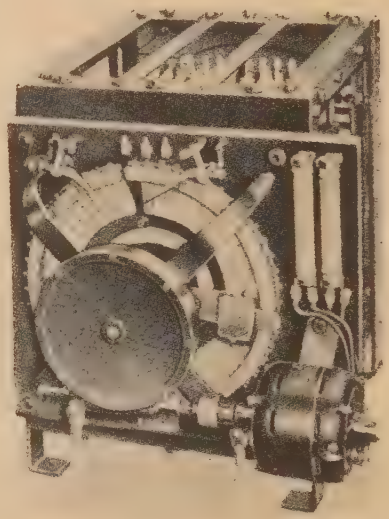
Общий вид установки с передачей посредством валов и конических шестерен представлен на фиг. 34.

Если желательно для пускового или регулирующего реостата осуществить электрическое управление, то для этой цели устраивается привод подвижного контакта посредством небольшого электродвигателя. Фиг. 35 показывает электромоторную установку для управления пусковым или регулирующим реостатом. Передача, как видно из фиг. 35, осуществлена посредством червячного сцепления. Передача вращения от вала зубчатого колеса к валу ступенчатого переключателя реостата может производиться также и посредством цепи. Общий вид реостата с электрическим приводом посредством цепной передачи представлен на фиг. 36. Передача от электродвигателя к валу ступенчатого

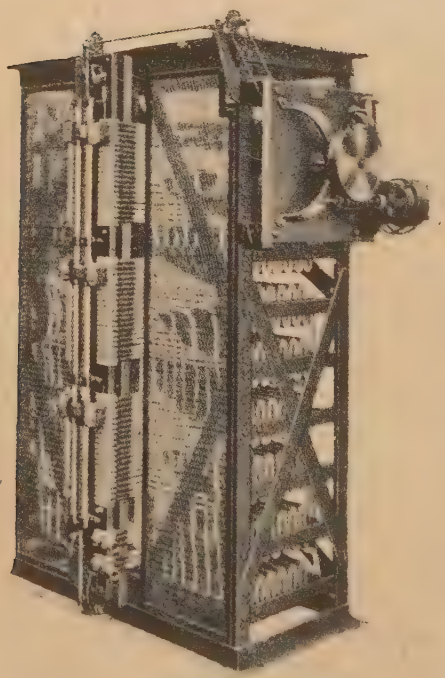
переключателя при таком устройстве иногда выполняется так, что подвижной контакт может совершать свой полный путь в несколько минут.



Фиг. 34.



Фиг. 35.

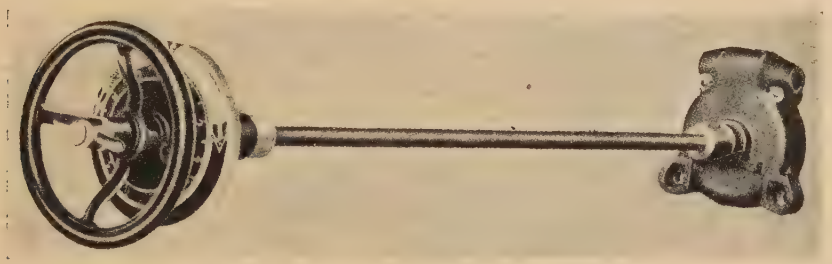


Фиг. 36.

Если реостат имеет контакторный переключатель, то автоматическое, полуавтоматическое или дистанционное управление осуществляется посредством электромагнитов (см. фиг. 23) или при помощи электромотора.

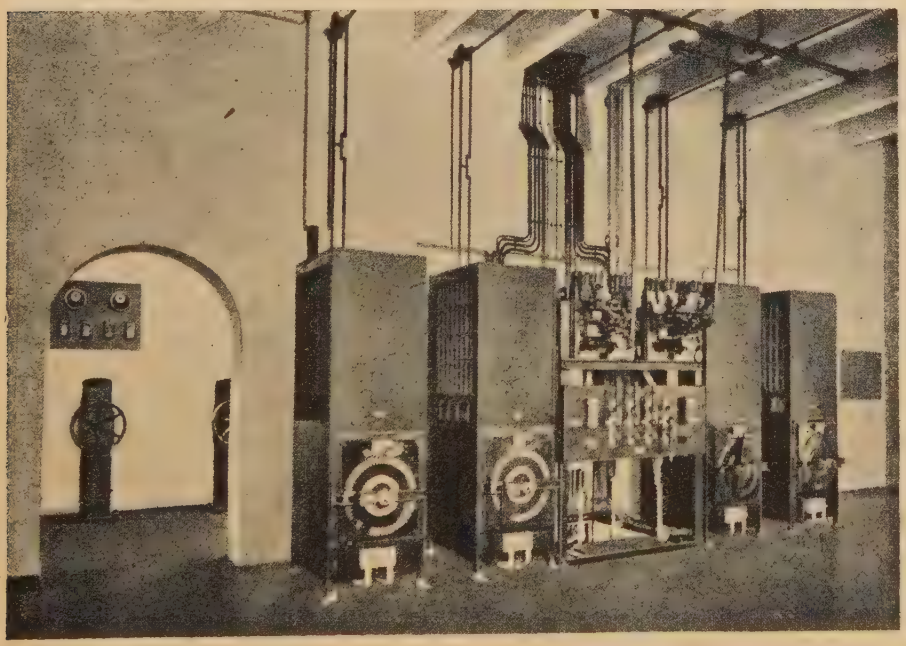
Часто управление реостатом делается комбинированным, от двигателя и от руки; в этих случаях в передаточный механизм вводится муфта. Когда приведение в движение механизма идет от электродвигателя, то муфта включается. Если желательно управлять от руки, муфта выключается при помощи пропущенной сквозь полувал управления на распределительном щите, и передача может совершаться

посредством цепной или валовой передачи, путем поворота колеса управления (фиг. 37).



Фиг. 37.

В практике часто встречается необходимость управления одновременно несколькими регулирующими реостатами; в этих случаях приведение в движение механизма управления может осуществляться при помощи одного общего двигателя. Однако при автоматическом



Фиг. 38.

управлении при помощи мотора всегда желательно иметь возможность управлять также и от руки как всей установкой вместе, так и каждым реостатом в отдельности. С этой целью каждый реостат снабжается

на распределительном щите отдельным колесом управления и тягой для раздвижной муфты. При включенной муфте реостат может управляться только совместно с другими от руки или при помощи электродвигателя, при выключенной же муфте — самостоятельно только от руки.

Подобные устройства применяются для групповых приводов, т. е. в случаях одновременного приведения в движение переключателей нескольких реостатов.

Групповое управление с успехом применяется для регулирующих реостатов, включаемых в цепь возбуждения нескольких параллельно работающих синхронных генераторов. Такой способ управления имеет преимущества перед одиночным управлением не только в отношении удобства обслуживания, но также и потому, что при групповом управлении можно избежать появления больших реактивных выравнивающих токов во время регулирования напряжения параллельно работающих синхронных генераторов.

На фиг. 38 дан снимок установки пусковых и регулирующих станционных реостатов, а также и их приводов.

*

ГЛАВА ВТОРАЯ.

ЖИДКОСТНЫЕ РЕОСТАТЫ.

*

§ 10. Особенности устройства жидкостных реостатов. — Жидкостные реостаты по роду устройства значительно отличаются от вышеописанных металлических реостатов. Главные составные части металлического реостата: элементы сопротивления и ступенчатый переключатель, представляющие значительные конструктивные затруднения при их построении на большие мощности, выполняются здесь совсем в ином виде, чем у металлических реостатов.

Жидкостные реостаты применяются, главным образом, в качестве пусковых и нагрузочных, и они могут с успехом обслуживать мощные электрические установки, где применение металлических реостатов становится или затруднительным или совсем невозможным. Для иллюстрации достаточно указать на то, каких усилий стоило заводу Сименс и Шуккерт (Simens & Schuckert) построить ступенчатый переключатель для пуско-регулирующего реостата подъемного мотора на 1 500 *HP*. Этот огромный реостат был представлен в 1901 году на дюссельдорфской выставке. Диаметр коллекторо-образного ступенчатого переключателя достигал 3 *m* и длина отдельных угольных контактов — 45 *cm*. Трудности построения заставляли думать, что это являлось пределом дальнейшего развития пусковых реостатов. Однако выход из создавшегося положения дали жидкостные реостаты, которые в последнее время получили исключительное применение для установок больших мощностей, особенно при переменном токе. В настоящее время строят водяные реостаты до 2 500 *kW*.

Жидкостный реостат представляет собой аппарат, где роль сопротивления и ступенчатого переключателя металлического реостата заменяет одновременно жидкость (обычно раствор соды в воде или просто вода), с погружающимися в нее металлическими электродами. Жидкостные реостаты имеют то большое преимущество, что при помощи их можно достигать совершенно плавного изменения сопротивления — это с одной стороны, и с другой — посредством изменения концентрации

раствора можно получать при одном и том же реостате различные пределы изменения сопротивления и, следовательно, делать его пригодным для различных напряжений.

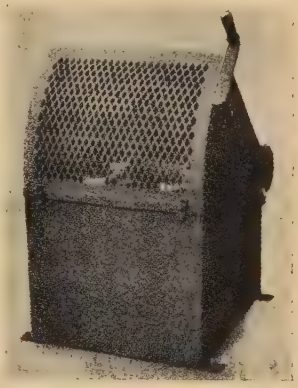
Насколько велико влияние, например, соды в растворе, видно из того, что при 10 % ее содержания по весу, проводимость раствора приблизительно в 84 раза больше, чем простой воды. Однако жидкостные реостаты с содержанием раствора соды или какой-нибудь другой соли имеют то неудобство, что не могут подвергаться нагреву до температуры кипения, так как раствор дает быстро осадок в виде ила, нарушающего нормальную работу реостата. По этой причине при продолжительном регулировании или частых пусках двигателя такие реостаты необходимо снабжать приспособлениями для искусственного охлаждения жидкости. Если охлаждающая вода, протекающая по трубам, нагревается примерно на 40° *C*, то, следовательно, 1 *l* должен унести с собой 4,19·40 *kWsec.*; последнее показывает, что для охлаждения растворов в мощных реостатах с частыми пусками или продолжительными регулированиями необходимо пропускать большие количества охлаждающей воды. Более надежными и экономичными в работе, в случае больших поглощаемых мощностей, оказались так называемые горячие водяные реостаты. Сопротивлением в них служит обыкновенная вода, лишенная добавочных примесей, с нормальной рабочей температурой 100°*C*. Энергия, поглощаемая реостатом, отводится в виде пара. Как известно, для испарения одного литра воды затрачивается около 600 *Cal* или 4,19·600 *kWsec.*; следовательно горячие водяные реостаты требуют при своей работе в 15 раз менее расхода воды, нежели жидкостные реостаты с растворами. Но горячие водяные реостаты, в которых электролитом служит обыкновенная чистая вода, обладающая незначительной проводимостью, получаются очень громоздкими, так как приходится обыкновенно включать несколько параллельных групп электродов с большими поверхностями.

Практика показала, что при переменном токе действие жидкостных, особенно горячих водяных реостатов получается устойчивое и надежное. При постоянном же токе встречается целый ряд затруднений: во-первых, проходящий через жидкость постоянный ток производит электролиз раствора и образует большие количества гремучего газа, который в случае образования искры легко дает взрыв и способствует короткому замыканию между электродами; во-вторых, постоянный ток сравнительно быстро разъедает электродные пластины и способствует сильным илистым отложениям в реостате. Все эти обстоятельства заставили отказаться от применения жидкостных реостатов в мощных ответственных установках постоянного тока.

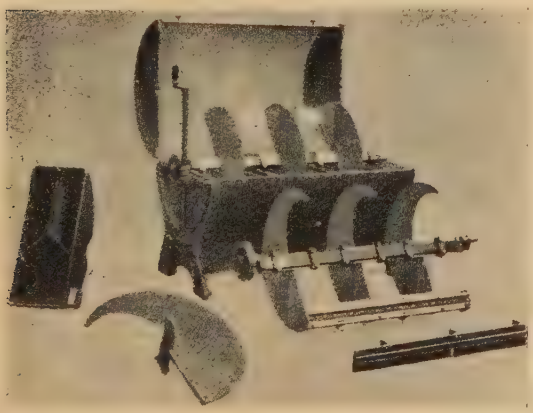
По характеру устройства и роду работы современные типы жидкостных реостатов можно подразделить на следующие основные группы:

a) реостаты с неподвижным уровнем жидкости и перемещающимися электродами; *b*) реостаты с подвижным уровнем жидкости и неподвижными электродами; *c*) горячие водяные реостаты; *d*) фитильные реостаты.

§ 11. Жидкостные реостаты с подвижными электродами. — Жидкостный реостат с подвижными электродами не представляет ничего сложного по своему конструктивному выполнению. Он имеет сосуд (один — в случае постоянного и однофазного тока, а также для трехфазного тока при включении в треугольник, или три — в случае включения звездой), наполненный раствором соды или водой. Подвижные электроды плотно прикрепляются на общем металлическом изолированном валу, конец которого снабжается червячным колесом, сцепляющимся с червяком рукоятки управления. Именно червячная передача здесь применяется потому, что она обладает свойством самоторможения, благодаря чему электроды можно устанавливать в любом положении, не опасаясь их спадания в положение короткого замыкания. Малый жидкостный реостат для постоянного и однофазного переменного тока мощностью до 20 *kW* представлен на фиг. 39.



Фиг. 39.

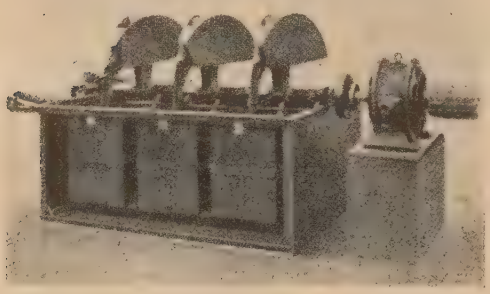


Фиг. 40.

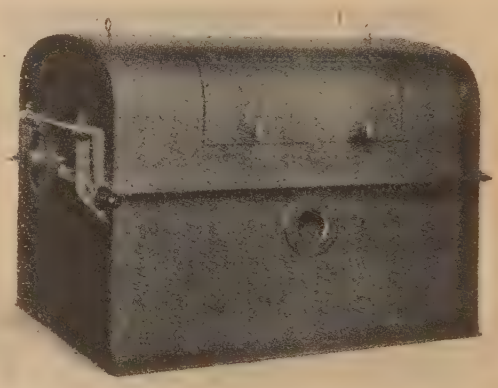
Другой реостат для трехфазного тока с отдельными сосудами в разобранном и собранном виде представлен на фиг. 40. Этот реостат имеет три изолированных друг от друга металлических сосуда, корпус которых представляют неподвижные электроды; каждый сосуд имеет в нижней своей части вывод для присоединения внешних проводов, а сверху контакт для замыкания накоротко сопротивлений. Подвижные электроды, имеющие секирообразную форму, укрепляются на одной оси и

соединяются электрически между собой посредством медной шины. Сосуды для жидкости нормально выполняются из чугуна; подвижные электроды — редко из чугуна, чаще из толстого листового железа.

На фиг. 41 дан снимок трехфазного жидкостного реостата, подвижные электроды которого приводятся в движение посредством электродвигателя. Для пуска электродвигателей мощностью до 1 500 kW в тех случаях, когда реостат должен отводить продолжительное время большое количество тепла, применяются реостаты с искусственным охлаждением. Последнее устраивается либо при помощи внутренних охладителей, либо посредством внешних охладителей. Внутренние охладители представляют собой просто радиаторы, вделанные внутрь реостата, по которым, по мере надобности, может пропускаться то или иное количество охлаждающей воды. Фиг. 42 представляет общий вид жидкостного реостата с внутренним охлаждением. На снимке виден фланец, к которому присоединяется водопроводная труба. При внешнем охлаждении охлаждающая вода прогоняется по трубам специального бака, расположенного вне реостата, через который уже при помощи центробежного насоса пропускается электролит реостата. Последний способ охлаждения предпочтительнее в том отношении, что путем подбора того или иного охладителя можно по желанию в значительных пределах изменять допустимую мощность для одного и того же пускового или нагрузочного жидкостного реостата.



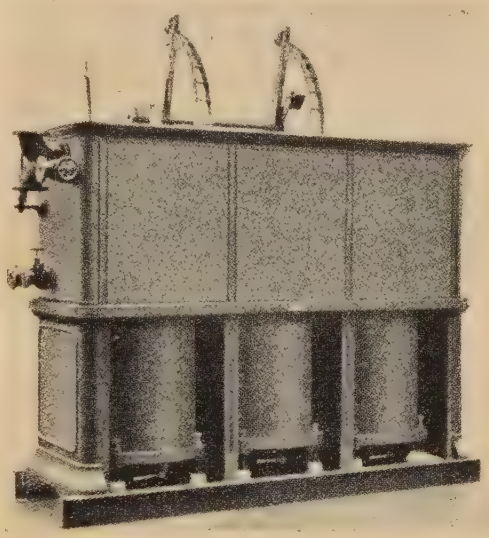
Фиг. 41.



Фиг. 42.

Жидкостные реостаты устраиваются также и с горизонтально расположенными электродными поверхностями. Сосуды в этом случае выполняются в виде вертикальных цилиндров из обожженной глины.

Ранее каждый цилиндр имел заложенный на дне круглый электрод, параллельно которому при помощи специальных штанг перемещался другой электрод, тоже плоский и парный ему. Общий вид такого реостата представлен на фиг. 43. Это устройство, подкупающее своей простотой, однако, не обнаруживало хороших качеств при работе. С одной стороны, эта конструкция давала недостаточные пределы регулирования сопротивления вследствие наличия плоских электродов, с другой, — благодаря быстрому нагреву жидкости, сосуды из глины легко лопались. Такие повреждения крайне нежелательны, так как жидкость вытекает из сосуда и установка на продолжительное время может выйти из строя. Наконец на стенках глиняных цилиндров и электродных поверхностях осаждается большое количество ила, заставляющего производить частые разборки и очистки сосудов и электродов. Жидкостные реостаты такой конструкции в настоящее время постепенно выходят из употребления, благодаря указанным недостаткам в работе.



Фиг. 43.

В настоящее время находят бо́льшее применение жидкостные реостаты с конусообразными и кольцевыми электродами, что дает более широкие пределы регулирования сопротивления. Устройство жидкостного реостата с конусообразными электродами представлено на фиг. 44. Как можно видеть из рисунка, неподвижные электроды реостата удерживаются на фарфоровых трубках, внутри которых проходят медные токопроводящие стержни, присоединенные к внешним зажимам реостата. Подвижные электроды перемещаются при помощи штанг по фарфоровым трубкам как направляющим, для чего они имеют отверстие в центре. Все три подвижных электрода коротко замкнуты между собой, образуя нулевую точку включения звездой.

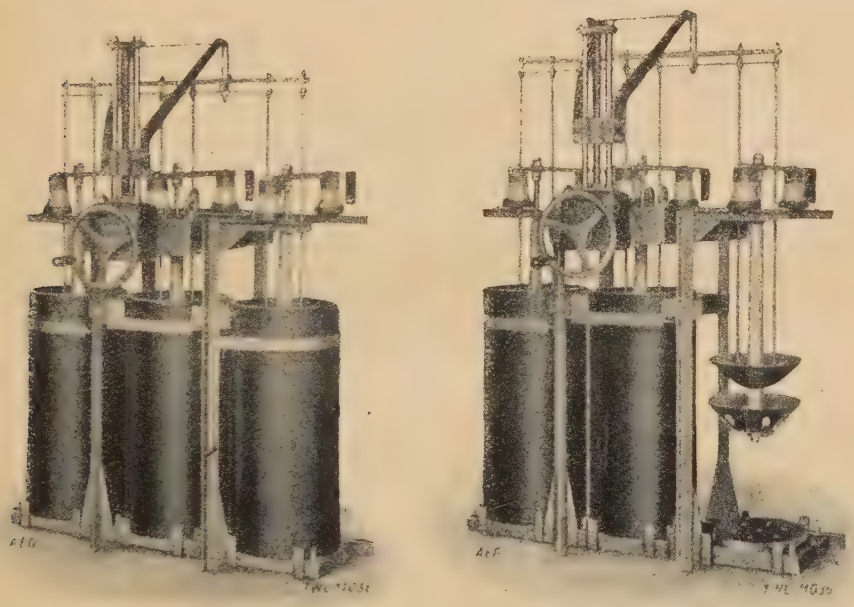
Данные о нормальных типах пусковых жидкостных реостатов для асинхронных двигателей с перемещающимися электродами приведены в таблицах 11.

Таблица 11.

Нормальные типы жидкостных реостатов с подвижными электродами, выпускаемых заводом S. S. W

Моторная мощность kW	Моторная мощность HP	Напряжение ротора V	Продолжит. подводимая мощность kW	Допустимая сила тока при кор. зам. контактов. A	Объем жидкости сосудов l	Общий вес kg
Без искусственного охлаждения						
20	27	500	0,75	200	8	28
75	102		2,4	250	42	97
220	300		3,5	600	56	265
220	300		5	600	105	325
500	680	1 000	5	600	240	530
800	1 090		10	600	580	1 050
1 100	1 500		15	600	1 100	1 175
1 500	2 050		20	1 000	1 600	1 163
С искусственным охлаждением. (Внутреннее охлаждение)						
500	680	1 000	25	600	220	940
800	1 090		50	600	540	1 530
1 100	1 500		70	600	1 050	1 700
1 500	2 050		90	1 000	1 540	2 200
С искусственным охлаждением. (Внешнее охлаждение)						
500	680	1 000	Зависит от охладителя	600	240	855
800	1 090			600	580	1 430
1 100	1 500			600	1 100	1 575
1 500	2 050			1 000	1 600	2 030

§ 12. Жидкостные реостаты с перемещающимся уровнем жидкости. — Жидкостные реостаты с неподвижными электродами и перемещающимся уровнем жидкости в основном состоят из нижнего и верхнего рабочего бака. Электроды располагаются в верхнем баке (фиг. 45), где они неподвижно закрепляются. Перемещение уровня жидкости достигается при помощи радиальной (иногда плоской) заслонки, сбалансированно сидящей на валу. Один конец вала выступает через кожух реостата, на который, в зависимости от рода привода, может быть насажена соответствующая рукоятка или зубчатое колесо. Электролит подается из нижнего бака в верхний рабочий бак с постоянной скоростью при помощи центробежного насоса, сцепленного с электродвигателем.

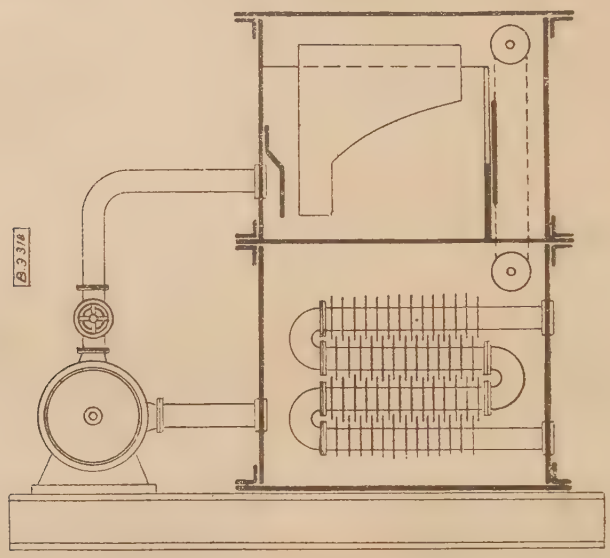


a *b*

Фиг. 44.

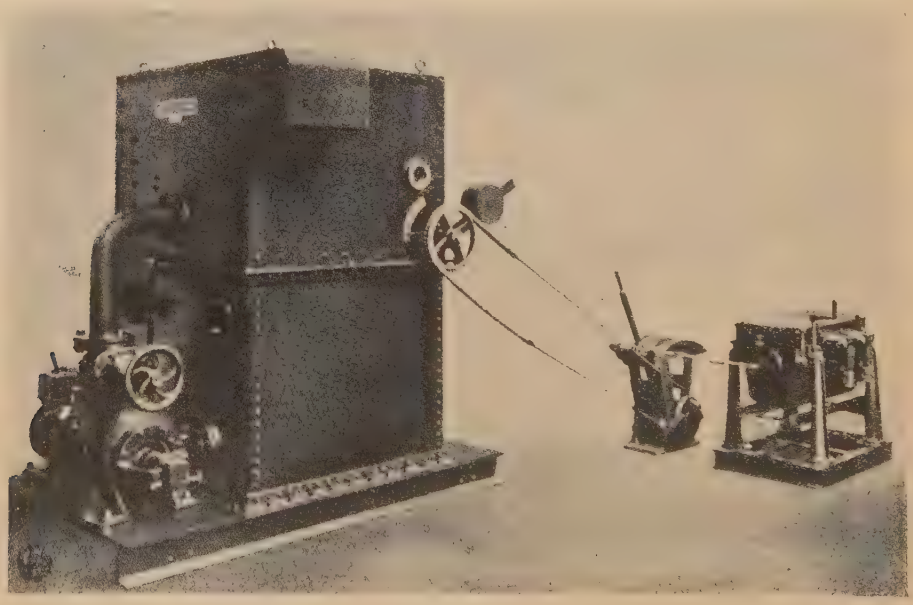
После окончания пускового процесса заслонка реостата быстро возвращается в свое первоначальное состояние покоя, т. е. в нижнее положение, благодаря чему нагретая жидкость стекает в нижний бак. Для охлаждения жидкости в нижнем баке устраиваются обычно радиаторы (фиг. 45) с большой поверхностью охлаждения, через которые пропускается охлаждающая вода. Фиг. 46 дает общий внешний вид схематически показанного на фиг. 45 жидкостного реостата, предназначенного для шахтного подъемного асинхронного

двигателя. По объему содержимого нижний бак делается в 3—4 раза более верхнего для того, чтобы охладитель работал с бо́льшим ис-



Фиг. 45.

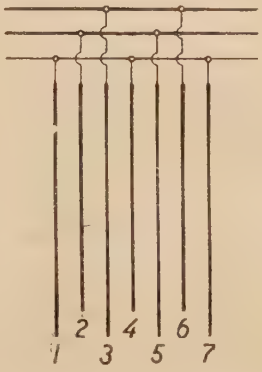
пользованием и в рабочий период времени, т. е. когда часть жидкости нагнетается в верхний бак.



Фиг. 46.

Для достижения возможно плавного изменения сопротивления и для большей компактности реостата применяют обычно несколько групп электродов различной длины, включенных параллельно. Включение промежуточных электродов различной длины очень выгодно в том отношении, что по мере повышения уровня жидкости напряжение, приложенное к реостату, обычно падает, и это обстоятельство позволяет почти не раздвигать основные электроды, если хотят между ними вделать промежуточные, т. е. использовать верхние пространства между основными электродами для увеличения проводимости реостата.

Фиг. 47.



Фиг. 48.

Включение жидкостных сопротивлений реостатов с перемещающимся уровнем жидкости обычно выполняется треугольником, т. е. электроды всех трех фаз помещаются в один общий бак или в виде симметричной системы (фиг. 47), или системы с замыкающим электродом, который ставится для получения равенства отдельных фазовых сопротивлений (фиг. 48). Расположение и порядок включения системы с замыкающим электродом можно представить в табличном виде; например, согласно фиг. 48 получается

фаза *A* соединяется с электродами	1			4			7
„ *B* „ „ „		2			5		
„ *C* „ „ „			3			6	

здесь электрод 7 является замыкающим и присоединяется к той же фазовой цепи, что и первый.

Последняя система, т. е. с замыкающим электродом, является более предпочтительной, чем с симметричным расположением электродов (фиг. 47), так как в этом случае получается равномерная плотность тока по всей поверхности электрода и равномерная нагрузка электролита, заключенного между электродными поверхностями. Это обстоятельство очень важно в отношении как износа электродов, так и степени использования объема электролита в отношении нагрева.

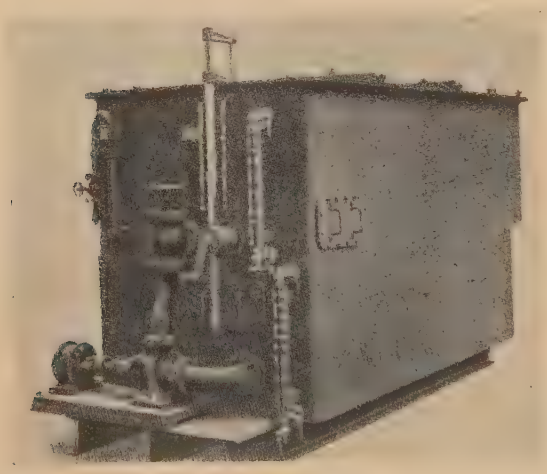
Для предохранения электродных пластин от обгорания, они в нижней своей части обычно наращиваются еще пластинами

четырехугольной продолговатой формы, образующими в то же время так называемую предварительную ступень сопротивления реостата.

Однако, несмотря на эту меру защиты электродов, полное выключение их под нагрузкой не рекомендуется, так как, помимо быстрого износа пластин, могут иметь место взрывы гремучего газа от искры, образующейся при размыкании между пластинами и жидкостью.

Жидкостные реостаты с растворами каких-либо солей имеют вообще тот недостаток, что проводимость электролита сильно меняется с температурой нагрева; так, например, проводимость раствора соды при 100° C приблизительно в 2,7 раза больше, чем при 20° C, т. е. холодный реостат имеет значительно большее сопротивление, нежели горячий. Это обстоятельство заставляет заботиться о том, чтобы жидкость успевала остывать за период покоя от одного пуска до другого и чтобы реостат не включался в нагретом состоянии, если он на это не рассчитан. Кроме того, как уже говорилось ранее, растворы солей в воде склонны давать весьма нежелательные осадки и загрязнять реостат, что нужно всегда иметь в виду при применении жидкостных реостатов.

§ 13. Горячие водяные реостаты. — Для пуска в ход очень больших двигателей с продолжительным регулированием числа оборотов особенное предпочтение нужно отдать горячим водяным реостатам, работающим с обыкновенной чистой кипящей водой. Этот тип реостатов особенно широкое применение находит для пуска и регулирования скорости вращения в асинхронных двигателях больших прокатных станов, мощностью от 900 до 2 500 kW. Горячие водяные реостаты по своему конструктивному выполнению отличаются от жидкостных реостатов с растворами, описанных ранее, значительно большими размерами (вследствие малой проводимости воды) и отсутствием охлаждающего устройства. Принцип действия горячих водяных



Фиг. 49.

реостатов, как уже упоминалось, основан на отводе поглощаемой реостатом энергии посредством выпаривания воды. Нормальная работа реостата протекает, таким образом, при кипящей воде (100° *C*), благодаря чему удельная проводимость жидкости все время остается неизменной.

На фиг. 49 представлен внешний вид такого водяного горячего реостата. Он состоит из верхнего и нижнего баков. В верхнем баке закреплены неподвижно несколько параллельно включенных групп электродных пластин различной высоты. Вода посредством центробежного насоса поднимается из нижнего бака в верхний. Регулирование подачи воды может производиться при помощи вентиля, включенного в трубопровод для питающей воды. Перемещение уровня воды достигается при помощи изменения положения подвижной заслонки, приводимой в действие или от руки, или при помощи электродвигателя.

К недостаткам горячих водяных реостатов следует отнести их относительно большие размеры. К преимуществам — надежность работы, редкие осмотры и разборка реостатов для чистки, так как вода дает незначительный осадок, не большой расход воды сравнительно с жидкостными реостатами с искусственным охлаждением и наконец отсутствие охладительного устройства.

Данные о пусковых горячих водяных реостатах, выполняемых в настоящее время заводом S. S. W., представлены в табл. 12.

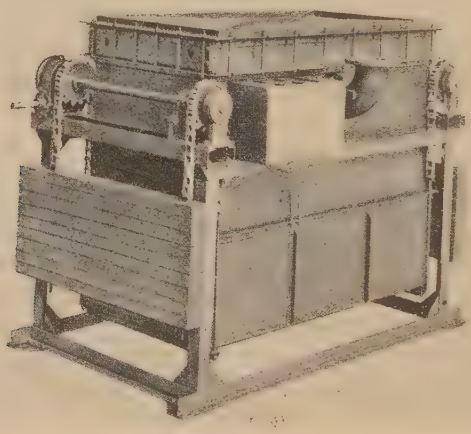
Таблица 12

Нормальные типы горячих водяных реостатов, выпускаемых заводом S. S. W.

Моторная мощность				Пусковое время *мин.*	Продолжительная максимальн. от. вод. мощность *kW*	Общий объем воды *l*	Общий вес реостата *kg*
Редкий пуск		Частый пуск					
kW	*HP*	*kW*	*HP*				
900	1 220	600	815	3 — 6	150	1 100	1 100
1 200	1 750	900	1 220	4 — 8	220	1 400	2 800
2 200	3 000	1 500	2 050	5 — 10	370	2 000	3 400

Кроме описанного вида водяных реостатов, особый интерес представляет еще горячий водяной реостат Броун-Бовери. Он состоит

из верхнего подвижного и нижнего неподвижного баков. Верхний подвижной бак подвешен на цепях и входит свободно в нижний — неподвижный. Перемещение верхнего бака достигается при помощи червячной передачи, приводимой в действие или от руки, или при помощи электрического привода. Для уменьшения усилий, потребных для перемещения верхнего бака, он снабжается противовесами, подвешенными на противоположных концах цепей, поддерживающих бак (фиг. 50). Электродные пластины закреплены непо-



Фиг. 50.

движно в нижнем баке и имеют форму с расширением кверху. Принцип действия такого реостата подобен действию газометра. Верхний бак, обращенный дном вверх и заполненный воздухом, опускается в нижний бак своей открытой стороной. Жидкость (вода), при этом находящаяся в нижнем баке, частью заходит, сжимая воздух, в верхний бак, большая же часть вытесняется и заполняет пространство между стенками обоих баков. Когда подвижной бак находится в самом нижнем положении, реостат имеет наибольшее сопротивление. При подъеме подвижного верхнего бака жидкость в нижнем баке начинает подниматься и сопротивление реостата падает. В самом высшем положении верхнего бака реостат приобретает минимальное сопротивление.

Так как энергия, поглощаемая реостатом, вызывает испарение воды, то следовательно реостат требует время от времени пополнения новой водой. Однако добавление вместо выпаренной воды все новых и новых количеств свежей воды (не дестиллированной) ведет к неже-

лательным нарастаниям на стенках баков и электродах накипи. Во избежание этого неудобства горячий водяной реостат Броун-Бовери снабжается конденсатором в виде системы труб, расположенных под дном верхнего подвижного бака. При такой системе требуется добавлять лишь незначительное количество новой воды для пополнения уровня в реостате.

Данные водяных реостатов, выполняемых заводом Броун-Бовери, приведены в таблице 13.

Таблица 13

Нормальные типы горячих водяных реостатов завода Броун-Бовери.

a. Реостаты без конденсации

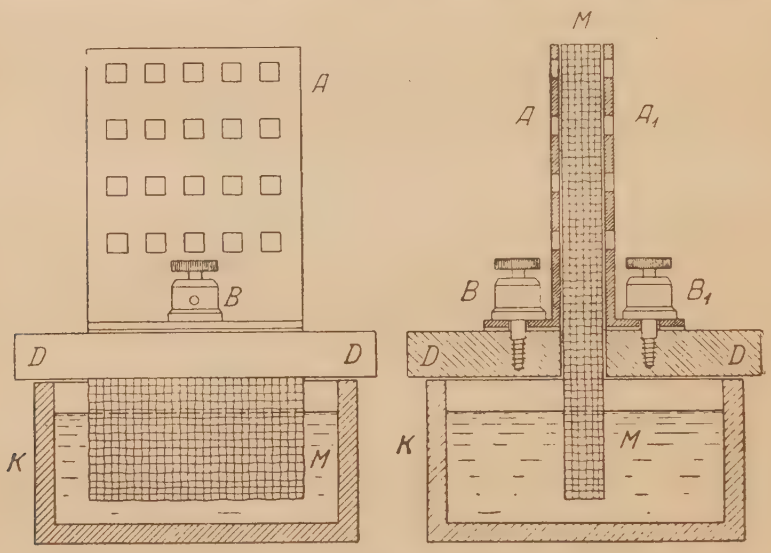
Мощность мотора		Объем воды в реостате	Максимальное допустимое напряжение	Номинальная сила тока
Пуск под нормальн. нагрузкой	Пуск под двойной нагрузкой			
kW	*kW*	*l*	*V*	*A*
500	250	300	1 200	600
1 200	600	750	1 200	600
2 400	1 200	1 500	2 000	1 000

b. Реостаты с конденсацией

Мощность мотора при пуске с нормальным током	Максимальная продолжительная мощность	Расход воды в реостате через выпаривание	Расход воды на конденсацию при нагреве ее до 70°*C*
в *kW*	*kW*	*l/час.*	*l/мин.*
500	120	6	25
1 200	400	15	84
2 400	800	30	170

§ 14. Фитильный жидкостный реостат Дрейера. — Действие этого реостата основано на принципе подачи жидкости к электродным поверхностям посредством фитиля. Устройство фитильного реостата видно из фиг. 51. Он состоит из двух прямоугольных электродов,

неподвижно закрепленных на плите из какого-либо изоляционного материала. Между электродами помещается фитиль или какое-либо аналогичное по действию пористое тело; фитиль пропускается через прорез в изоляционной плите в сосуд, наполненный раствором какой-либо соли. При наложении напряжения на электродные пластины, через фитиль, напитанный раствором, проходит ток, сила которого зависит от поверхности электродов, расстояния между ними и концентрации электролита; при этом раствор фитиля нагревается и испаряется, взамен которого пористый фитиль автоматически подает к месту испарения свежий раствор. Чем бо́льшая пропускается через



Фиг. 51.

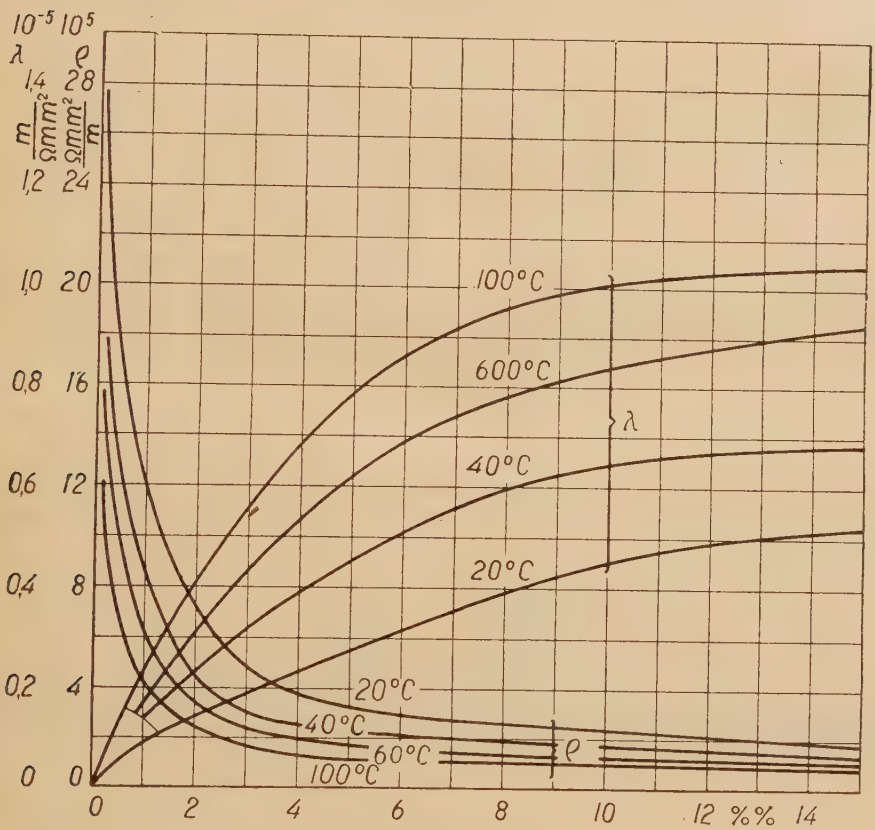
реостат сила тока, тем интенсивнее происходит испарение жидкости, и в то же время интенсивнее становится подача новой жидкости из нижнего сосуда.

К недостаткам описанного реостата нужно отнести невозможность регулирования сопротивления, к преимуществам — его автоматичность в отношении подачи раствора и простоту конструкции.

§ 15. Растворы, применяемые в жидкостных реостатах. — Как уже говорилось, в жидкостном реостате сопротивление представляет водный раствор какой-либо соли или обыкновенная вода.

Абсолютно химически чистая вода не является проводником электрического тока. Обыкновенная вода (ключевая, речная и т. д.) содержит в себе всегда небольшие количества естественно растворенных солей. Однако этого количества в большинстве практических

случаев бывает недостаточно, вследствие чего обыкновенная вода обладает слишком большим удельным сопротивлением (около $19\,600\,000 \frac{\Omega\, mm^2}{m}$ при 20° C) и применяется только в горячих водяных реостатах, где электроды получают относительно большие поверхности. Это обстоятельство заставляет прибегать к водным растворам солей,



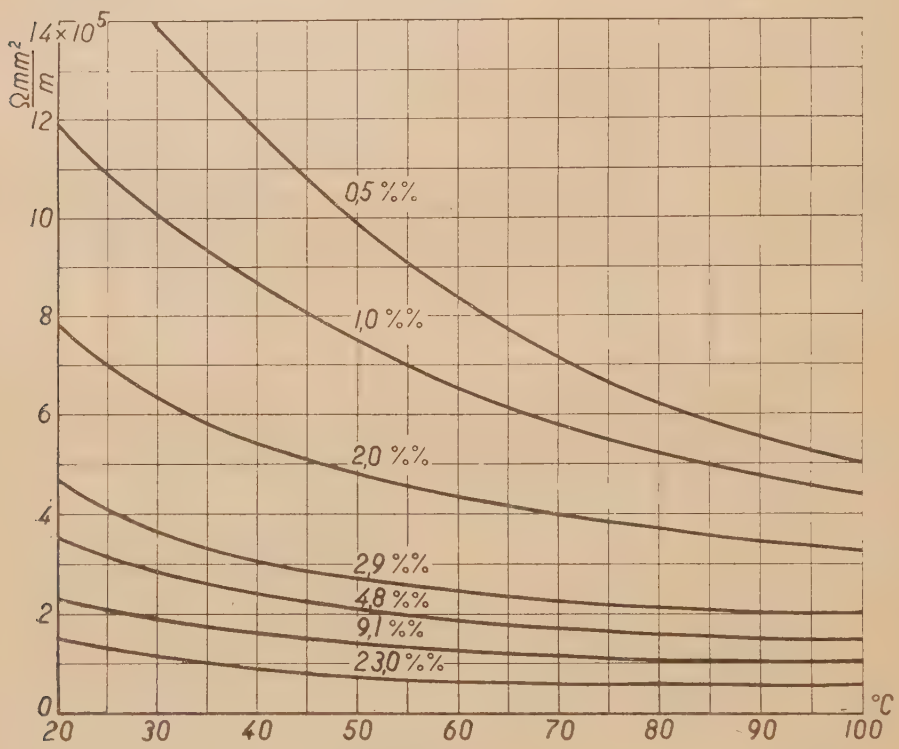
Фиг. 52.

из которых наиболее широкое распространение получил раствор обыкновенной углекислой соды (Na_2CO_3).

Удельное сопротивление (или проводимость) раствора в сильной степени зависит от его концентрации, т. е. процентного весового содержания соли. Кроме того при одной и той же концентрации раствора на удельное сопротивление его оказывает сильное влияние температура нагрева. Очевидно, что для правильной оценки действия реостата или предварительного его расчета важно знать эти зависимости.

На фиг. 52 приведены кривые, представляющие зависимость удельного сопротивления и проводимости от весовой процентной концентрации для различных температур нагрева содового водного раствора.

На фиг. 53 представлена зависимость изменения удельного сопротивления от температуры нагрева для различной концентрации раствора соды.



Фиг. 53.

Наиболее употребительные в практике концентрации содового раствора колеблются в пределах от 5 до 10 %. Однако следует заметить, что желательно вообще применять растворы мало концентрированные, так как растворы с высокой степенью концентрации неустойчивы во время действия реостата и имеют склонность к образованию весьма нежелательных отложений на стенках реостатного бака и на электродных поверхностях.

Температура нагрева растворов, как правило, не должна достигать 100° C, так как кипение в сильной степени способствует образованию отложений. Максимальная допустимая температура нагрева колеблется от 80 до 90° C, причем меньшую величину нужно относить к случаю реостатов с неподвижной жидкостью.

Согласно нормам повышение температуры жидкости не должно превосходить 60° С.

Так как вода из раствора со временем испаряется, то следовательно в связи с этим меняется и концентрация раствора; поэтому необходимо следить всегда за состоянием жидкости в реостате и время от времени добавлять воды в электролит; однако этого делать продолжительно не рекомендуется, так как, несмотря на добавление воды, свойства электролита все же меняются, и поэтому необходимо через определенные промежутки времени, продолжительность которых устанавливается в зависимости от рода реостата, степени концентрации раствора и степени нагруженности (частота пуска, плотность тока и пр.), производить очистку электродов и бака реостата и заменять старый электролит новым свежим раствором.

*

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ПУСКОВЫХ РЕОСТАТОВ

*

§ 16. Общие соображения. — Под пуском в ход электрического двигателя понимают процесс, служащий для того, чтобы двигатель вывести из его неподвижного состояния и довести до номинальной скорости вращения, причем эта операция не должна вредно отзываться как на самом двигателе и соединенных с ним аппаратах или машинах, так и на сети, питающей двигатель.

В зависимости от рода двигателя и его размеров этот процесс, т. е. пуск в ход, может производиться различным образом.

Малые двигатели является возможным пускать в ход при помощи непосредственного приключения его зажимов к сети, находящейся под полным рабочим напряжением. Такой пуск в ход допускается для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения мощностью до $^1/_6$ *HP* при всех напряжениях и под полной нагрузкой, и для шунтовых — до 1 *HP* при напряжении до 120 *V* при условии пуска в ход вхолостую. Предохранительные устройства при этом должны быть рассчитаны для двигателей последовательного возбуждения приблизительно на двукратное, а для шунтовых двигателей на трехкратное значение номинального тока. Если такое включение двигателей производится посредством включателей валькового типа с двумя включающими положениями, то в этом случае является возможным осуществить сначала приключение двигателя помимо предохранителей непосредственно к сети и после того, как ток спадает примерно до своего номинального значения, переключить на второе положение, при котором рабочий ток направляется уже через предохранители. Такая система включения дает возможность выбирать предохранители на номинальное значение силы тока.

Для более крупных двигателей постоянного тока, мощностью до 3 *kW*, применяют иногда также способ с постоянно-включенным сопротивлением в цепи якоря, поглощающим около 15 % приложенного к двигателю напряжения и следовательно соответственно

увеличивающим расход энергии во время пуска. Однако при бо́льших двигателях и этот способ не достигает желаемой цели, так как пусковой ток получается все же столь большим, что появляется опасность повреждений обмоток двигателя, сильных недопустимых механических толчков и колебаний напряжения в питающей сети. Включать еще большее сопротивление в цепь якоря не является возможным ввиду значительного понижения коэффициента полезного действия (к. п. д.). В этом случае приходится прибегать к переменному пусковому сопротивлению — пусковому реостату.

С помощью пускового реостата в первый момент пуска имеется возможность ограничить силу тока в цепи якоря. По мере увеличения скорости вращения двигателя возрастает и противоэлектродвижущая сила якоря, ток в цепи якоря уменьшается; затем отдельные ступени сопротивления реостата постепенно выключаются и наконец при скорости вращения, близкой к номинальной, реостат коротко замыкается, и двигатель остается при работе непосредственно приключенным к сети. В качестве сопротивления в пусковых реостатах могут быть использованы как металлические, так и жидкостные проводники, принцип действия при этом как у тех, так и у других остается одинаковым.

Сказанное выше о двигателях постоянного тока может быть отнесено и к асинхронным двигателям, у которых роль якоря играет цепь ротора.

Простейшим асинхронным двигателем является двигатель с короткозамкнутым ротором; ротор этих двигателей состоит из пакетов железа, в пазах которого заложена короткозамкнутая обмотка в виде беличьего колеса или отдельных короткозамкнутых катушек. Пуск в ход такого рода двигателей осуществляется по большей частью либо непосредственно приключением к сети, либо переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

Непосредственное приключение к сети двигателя с короткозамкнутым ротором сопровождается толчком тока, достигающим обычно 4—6,5-кратного значения номинального тока. Большой пусковой ток трехфазного короткозамкнутого двигателя может быть уменьшен в момент пуска посредством переключения обмотки статора со звезды на треугольник. Двигатель пускается при соединении статорной обмотки звездой и по достижении им скорости вращения близкой к номинальной переключается на треугольник. Для осуществления такого пуска необходим специальный переключатель со звезды на треугольник, а статорная обмотка двигателя должна иметь шесть выводов, т. е. от каждой фазовой обмотки

должны быть выведены конец и начало. Такое включение допускается для короткозамкнутых двигателей до 12,5 kW, особенно в тех случаях, когда начальный пусковой момент двигателя невелик (максимум $^1/_3$ номинального). Амплитуда силы тока при первом включении, т. е. когда статор соединен в звезду, колеблется обычно приблизительно от 1,7 до 2,4-кратного значения номинальной силы тока; при переключении на треугольник — до 3-кратного номинального.

Однако при бо́льших мощностях двигателей ток включения и механические толчки при пуске в ход получаются столь значительными, что пуск в ход двигателя вышеизложенными способами представляет опасность в электрическом и механическом отношениях, и в этих случаях уже прибегают к помощи либо пусковых реостатов, либо к специальным схемам соединения роторных и статорных обмоток. Последние, однако, способы пуска в ход не имеют места для рассмотрения в настоящей книге, где предполагается разобрать лишь наиболее распространенный пуск с помощью реостата. Пусковой реостат включается в цепь ротора двигателя посредством специальных скользящих контактных колец, сидящих на общем с ротором валу двигателя. После того, как сопротивление пускового реостата совершенно выводится, щетки, скользящие по кольцам, приподнимаются и кольца между собою замыкаются накоротко посредством специальных приспособлений.

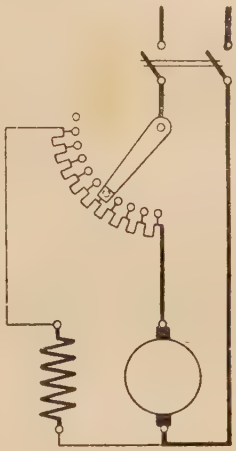
В зависимости от своего назначения и принципа действия пусковые реостаты получают различные устройства, формы и выполняются из различного количества материала, если даже требуется получить от них одно и то же сопротивление. Так например, если пуск в ход производится редко (например 1—2 раза в день), т. е. реостат действует с большими паузами, то сопротивление его строят обычно с небольшим количеством материала, и само тело сопротивления погружается в масло или заполняется песком для того, чтобы развивающееся в сопротивлении тепло в сравнительно небольшие промежутки времени могло быть передано окружающему веществу, обладающему большой сравнительно теплоемкостью, т. е. реостат в этом случае должен иметь большую постоянную времени нагрева.

Теплота, полученная окружающим сопротивление телом в короткий промежуток времени, отдается в окружающее пространство с поверхности реостата в течение большего промежутка времени — паузы от одного до другого пуска.

Если наоборот, реостат должен в сравнительно небольшие промежутки времени отдавать в окружающее пространство значительные количества тепла, что имеет место при частых пусках в ход двигателя, то в этом случае металлические реостаты должны иметь боль-

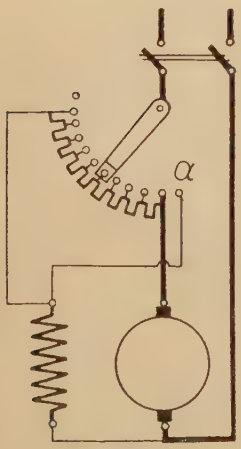
ную поверхность охлаждения при малом нагревающемся объеме материала и быть по возможности открытого типа, а жидкостные реостаты должны искусственно охлаждаться, т. е. реостаты должны иметь малую постоянную времени нагрева.

§ 17. Схемы включения реостатов для шунтовых двигателей. — При пуске в ход шунтовых двигателей необходимо, чтобы цепь возбуждения перед включением якоря находилась под полным напряжением сети, при этом условии двигатель может развить необходимый крутящий момент при меньшей силе тока в цепи якоря.



Фиг. 54.

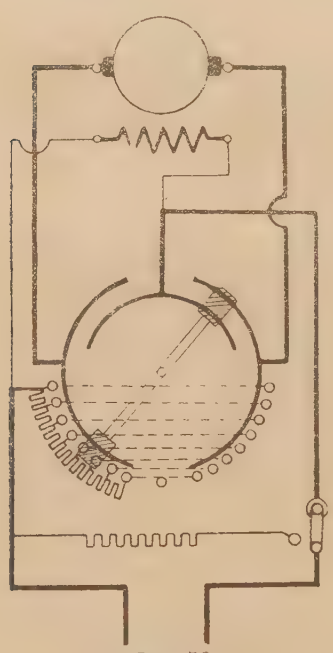
Включение обеих обмоток, т. е. шунтовой и якорной, может производиться также и одновременно (фиг. 54). Для осуществления этого шунтовая обмотка одним своим концом приключается к первому контакту пускового реостата так, что при первом положении подвижного контакта обмотка возбуждения выключается на полное напряжение сети. По мере включения ступеней пускового реостата, в цепи возбуждения сопротивление возрастает и происходит таким образом уменьшение силы тока возбуждения и увеличение потерь при прохождении силы тока возбуждения по ступеням сопротивления пускового реостата; однако потери мощности и напряжения в ступенях пускового реостата бывают обычно очень малы, вследствие того, что сопротивление пускового реостата составляет незначительный процент от сопротивления шунтовой обмотки.



Фиг. 55.

В очень малых двигателях с большим процентным расходом энергии в шунтовой обмотке потеря напряжения и нагрев сопротивлений пускового реостата могут быть слишком велики. В таких случаях приходится прибегать к устройству специального контакта в конце контактного ряда пускового реостата и несколько расширенного скользящего контакта рукоятки (фиг. 55). Из фигуры видно, что после того, как двигатель пущен в ход, сопротивление пускового реостата, которое еще остается включенным в цепи возбуждения, может теперь коротко замыкаться при помощи дополнительного контакта *a* и тогда обмотка возбуждения непосредственно приключается к напряжению сети.

На практике часто требуется иметь так называемые реверсивные двигатели, т. е. двигатели, у которых возможно менять направление вращения. Для этой цели строятся специальные пусковые реостаты, схематическое устройство которых видно из фиг. 56. Когда подвижной контакт реостата стоит на холостом контакте (фиг. 56), двигатель выключен; в зависимости от того, в какую сторону перемещать рукоятку реостата, получается различное направление вращения двигателя. При этом происходит изменение направления тока в цепи якоря, тогда как направление тока в цепи возбуждения остается постоянным.



Фиг. 56.

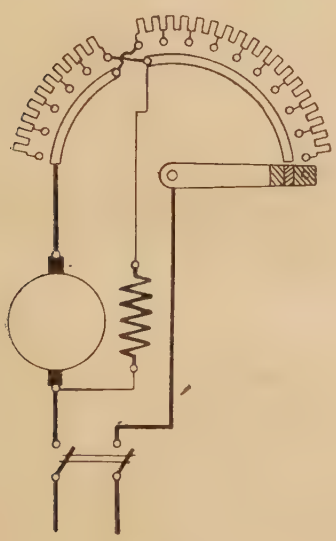
Как известно, при выключении обмотки возбуждения быстро исчезающий магнитный поток может навести в обмотке возбуждения очень большое напряжение, способное пробить или повредить изоляцию катушек. Это явление нужно всегда иметь в виду при проектировании пускового реостата.

В случаях применения схем фиг. 54 и 55 опасные перенапряжения в обмотке возбуждения не могут быть, так как здесь при выключении главного рубильника цепь возбуждения остается замкнутой на сопротивление пускового реостата и якоря двигателя. Однако в последней описанной схеме (см. фиг. 56) цепь якоря и пускового сопротивления отключается от обмотки возбуждения (горизонтальное положение рычага) и следовательно появляется опасность разрушительных действий во время выключения главного рубильника. Во избежание таких последствий устраивают специальные дополнительные сопротивления, вводящиеся в цепь возбуждения при выключении тока.

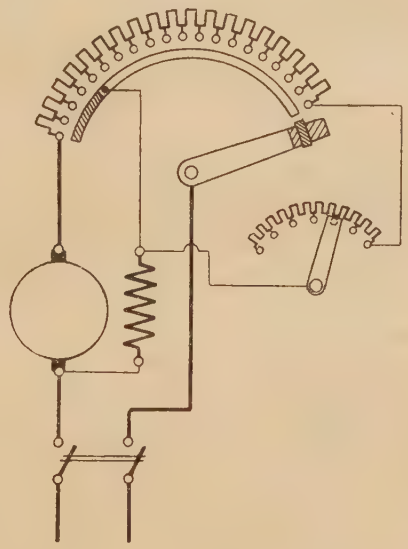
Схема включения пускового реостата с таким специальным сопротивлением и рубильником изображена на фиг. 56.

В практике часто совмещают в одном аппарате реостат, служащий для пуска в ход двигателя, и регулирующий реостат, включаемый в цепь возбуждения для регулирования магнитного потока, а следовательно и числа оборотов. Схема устройства такого пуско-регулирующего реостата изображена на фиг. 57, где оба сопротивления так смонтированы, что имеют ряд контактов, расположенных на одной и той же окружности, и общий рычаг с подвижными контактами.

Однако регулирующее сопротивление цепи возбуждения часто выполняется в виде отдельного реостата со своей собственной рукояткой, а пусковой реостат включается в цепь якоря двигателя так, чтобы получалась при этой комбинации поочередность действия пускового и регулирующего реостатов (фиг. 58). Как видно из фигуры 58, во время пуска в ход двигателя регулирующий реостат цепи возбуждения остается замкнутым накоротко посредством контактного кольца. Однако, когда рычаг пускового реостата становится на последние контакты, вводятся ступени регулирующего реостата, причем



Фиг. 57.



Фиг. 58.

ток возбуждения проходит последовательно и через сопротивление пускового реостата, которое в большинстве случаев составляет незначительную часть всего сопротивления цепи возбуждения.

Часто для предохранения двигателя и пускового реостата от всех последствий неправильного режима в работе или неправильного его включения прибегают к устройству специальных защитных приспособления.

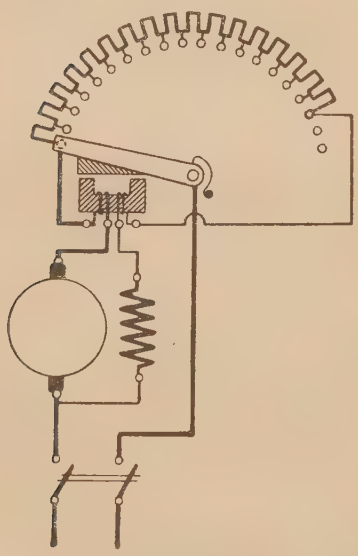
Повреждения двигателя и пускового реостата могут произойти по следующим причинам:

1. Когда напряжение питающей сети понижается или совсем исчезает и спустя некоторое время, когда двигатель остановится или замедлит заметно свой ход, опять появится. Ввиду того, что реостат при нормальной работе двигателя находится в выведенном состоянии, то в этом случае, если остановка двигателя не замечена сразу обслуживающим персоналом, появление вновь

напряжения вызывает большие толчки тока, могущие повредить установку.

2. Двигатель во время пуска в ход или работы чрезмерно перегружается. Такие перегрузки могут быть следствием недостаточной опытности персонала, обслуживающего установку, или вследствие случайного увеличения крутящего момента двигателя, которое может произойти либо из-за повреждений и поломок в установке, либо вследствие просто перегрузки станков, орудий или аппаратов, соединенных с двигателем.

Для защиты двигателей от приведенных выше возможных повреждений применяют самодействующие выключатели, обычно приспособленные к пусковым реостатам и действующие на рычаг скользящего контакта таким образом, чтобы поставить его в положение, соответствующее максимальному сопротивлению реостата или выключению всей якорной цепи (начальное положение).



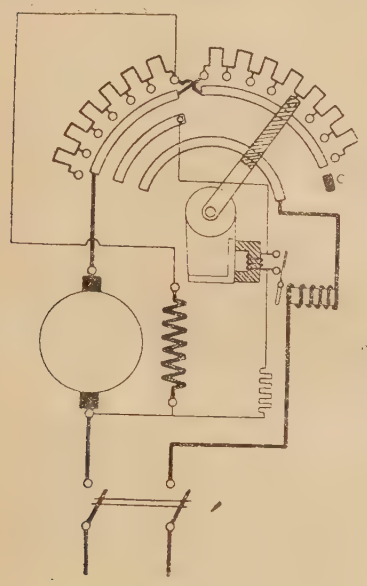
Фиг. 59.

Контактная рукоятка пускового реостата возвращается в начальное положение посредством пружины, а в рабочем положении удерживается при помощи электромагнита или непосредственно, или при больших силах от пружины, посредством защелки (собачки). На фиг. 59 показан пусковой реостат, в котором электромагнит, удерживающий рычаг реостата, имеет две обмотки: одну, соединенную последовательно с обмоткой возбуждения и другую — последовательно с якорем.

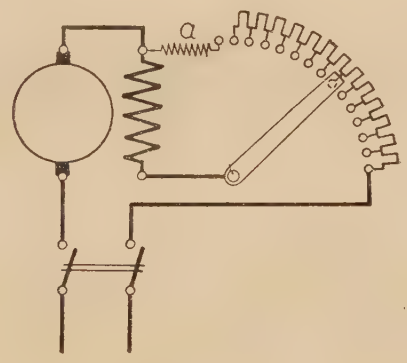
В случае, если обмотка электромагнита, включаемая в цепь возбуждения, создает слишком большое падение напряжения, то ее приключают к сети параллельно через дополнительное сопротивление. Шунтовая и сериесная обмотки электромагнитов действуют в магнитном отношении навстречу друг другу, причем преобладает поле (шунтовой обмотки) напряжения. Это преобладание необходимо для того, чтобы при перегрузке поле катушки тока ослабляло поле шунтовой обмотки. Если было бы наоборот, то поле бы усиливалось при перегрузках двигателя, и рукоятка не имела бы возможности выключиться.

В случае больших мощностей (свыше 100 kW) удерживать рукоятку при помощи простого электромагнита представляется затруд-

нительным. Тогда приходится прибегать к помощи комбинированных электромагнитных и механических держателей, при которых непосредственно на рычаг действуют только механические силы. Обычно для этой цели используются ленточные тормозы (простые или дифференциальные), приводимые в действие уже при помощи электромагнитов, питаемых или непосредственно от сети через дополнительное сопротивление, или включаемого последовательно с обмоткой возбуждения. Схематически устройство такого приспособления для пускового реостата представлено на фиг. 60. При нормальной работе, т. е. выведенном реостате, рычаг удерживается в левом положении посред-



Фиг. 60.



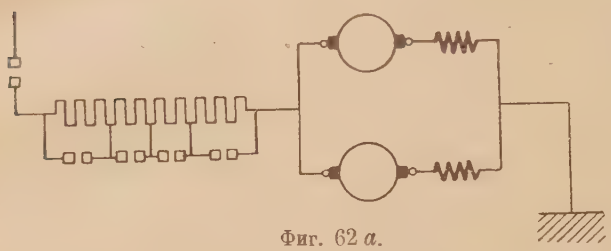
Фиг. 61.

ством ленточного тормоза с электромагнитом. В случае перегрузки двигателя, от действия сериесного электромагнита происходит короткое замыкание обмотки тормозного электромагнита, вследствие чего тормоз отпускается и рычаг под действием пружины отбрасывается в нулевое положение. При спадании же напряжения ток, текущий по обмотке тормозного электромагнита, уменьшается; вследствие ослабления поля электромагнита тормоз отпускается, а пусковой рычаг возвращается в нулевое положение.

Согласно нормам выключение реостата под действием предохранительных электромагнитных приборов должно происходить при падении напряжения на 35 % от номинального; при напряжении, равном 70 % от номинального, выключения может еще и не быть. Выключение при повышении силы тока в цепи якоря должно происходить в пределах, устанавливаемых в зависимости от назначения пускового реостата.

§ 18. Схемы включения реостатов для сериесных двигателей. — В сериес-двигателях ток, протекающий по обмотке якоря,

является одновременно и током возбуждения, так как в этого рода двигателях обе эти обмотки соединяются последовательно. На фиг. 61 представлена простейшая схема включения сериесного двигателя с пусковым реостатом.

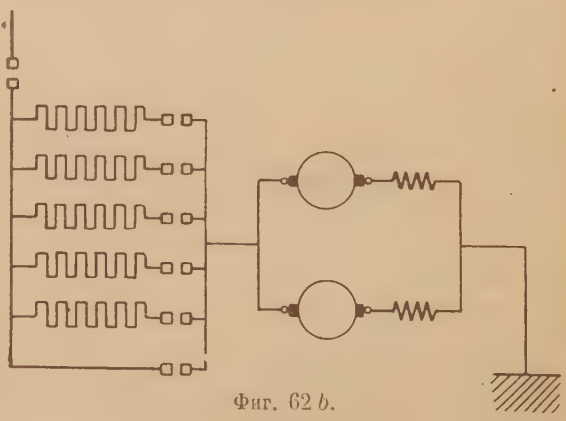


Фиг. 62 *a*.

Если рычаг реостата поворачивать по стрелке часов, то сопротивление цепи якоря двигателя падает и при положении рычага на последнем контакте сопротивление реостата выводится совсем, и двигатель остается включенным непосредственно на полное напряжение сети.

Ступени сопротивлений пусковых реостатов могут включаться последовательно, (см. фиг. 62 *a*) параллельно (фиг. 62 *b*) и последовательно-параллельно (фиг. 62 *c*). При последней схеме включения ступеней более экономично используется материал для сопротивлений.

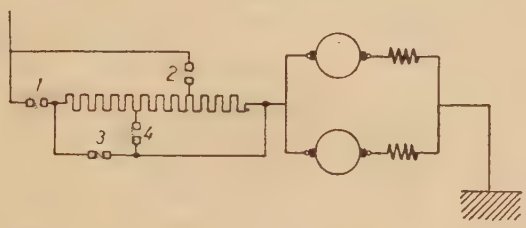
Как известно, при выключении тока возбуждения быстро исчезающий магнитный поток способен навести в обмотках двигателя (главным образом в обмотке возбуждения), высокое напряжение, могущее причинить повреждение изоляции машины. В шунтовых двигателях при обычной схеме пуска при выключении тока обмотки возбуждения (см. фиг. 54) она остается замкнутой на сопротивление пускового реостата и якоря двигателя, а потому не представляется опасности появления перенапряжений; в сериесных же двигателях это явление всегда ожет иметь место, благодаря общей последовательной цепи (пусковой реостат — якорь и обмотка возбуждения), вследствие чего при проектировании пусковых реостатов для этого рода двигателей это обстоятельство не следует упускать из вида. На фиг. 61 приведена схема пускового реостата с дополнительным сопротивлением *a*; при движении рычага против часовой стрелки, прежде чем он выключит ток цепи якоря и возбуждения, скользящий контакт найдет на непо-



Фиг. 62 *b*.

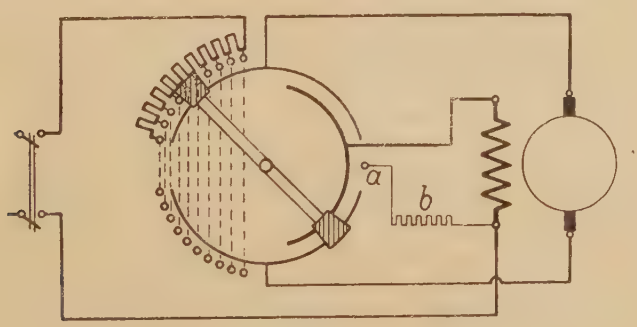
движный контакт, соединенный с одним из концов дополнительного сопротивления, и тогда обмотка возбуждения окажется замкнутой на это сопротивление (фиг. 61).

Если требуется менять направление вращения сериесного двигателя, то для этого необходимо изменять направление тока или в обмотке якоря, или в обмотке возбуждения (но не в обеих сразу). Принци-



Фиг. 62 *c*.

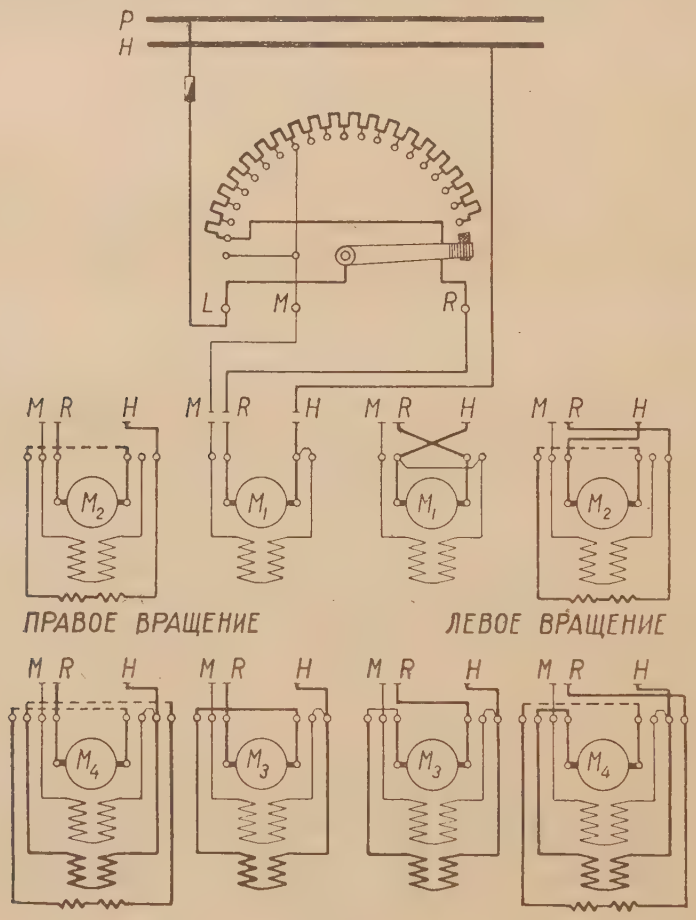
пиальная схема пускового реостата, предназначаемого для реверсивного сериесного двигателя, представлена на фиг. 63. Как видно из схемы фиг. 63, реостат устроен таким образом: когда подвижной контакт реостата находится на контакте *a*, цепь якоря двигателя разомкнута; при повороте рычага реостата по часовой стрелке в цепи якоря проходит ток в одном направлении, при повороте же рычага против часовой стрелки *a* ток в обмотке якоря течет в обратном направлении; ток же в обмотке возбуждения, как видно из схемы фиг. 63, независимо от положения рукоятки, сохраняет свое направление неизменным. Сопротивление *b*, указанное на фиг. 63, служит для поглощения за-



Фиг. 63.

паса магнитной энергии, освобождающейся при внезапном выключении тока, благодаря чему перенапряжения уменьшаются. Прежде чем подвижной контакт выключит ток в цепи двигателя, он замыкнет обмотку возбуждения на дополнительное сопротивление посредством контакта *a*.

Пусковые реостаты с предохранителями на случай снижения напряжения сети и перегрузки двигателя применяются для сериесных двигателей на тех же принципах, что и у шунтовых. Разница здесь состоит только в том, что обмотка напряжения держащего электромагнита всегда должна приключаться к сети или непосредственно



Фиг. 64.

или через добавочное сопротивление и не может быть приключена последовательно с обмоткой возбуждения, как у шунтовых двигателей, так как ток возбуждения сериесного двигателя является одновременно и током обмотки якоря, и таким образом действие катушки напряжения совпадало бы, очевидно, с действием сериесной катушки.

§ 19. Сводка схем включения пусковых реостатов для двигателей постоянного тока. На фиг. 64 приведена таблица принципиальных схем соединения шунтового и компаундного двигателей с пу-

сковым реостатом нормального типа. Схема включения сериесного двигателя на фиг. 64 не приведена, так как она может быть представлена схемой компаундного двигателя, если у последней отбросить шунтовую обмотку и соответственно упразднить выводной зажим реостата. На фиг. 64 дано также изображение включения в случае левого или правого вращения двигателя, причем слева на рисунке представлены схемы включения для правого вращения, а справа — для левого вращения двигателя.

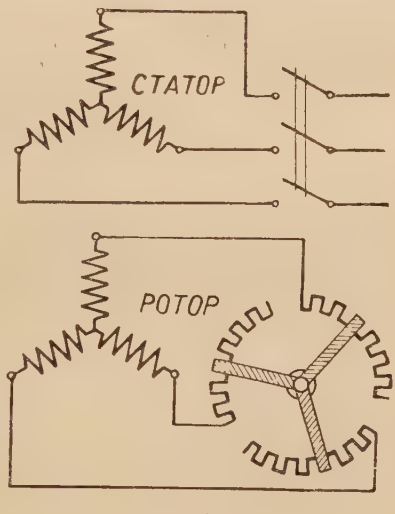
На фиг. 64 обозначены посредством

M_1 — шунтовой двигатель,

M_2 — шунтовой двигатель с дополнительными полюсами,

M_3 — компаундный двигатель,

M_4 — компаундный двигатель с дополнительными полюсами.



Фиг. 65.

§ 20. Схемы включения реостатов для трехфазных асинхронных двигателей. — Наиболее распространенная и простая схема включения пускового реостата трехфазного асинхронного двигателя изображена на фиг. 65. При этом включении фазовые обмотки ротора имеют отдельные ступени сопротивления, которые замыкаются между собою при помощи звездообразного подвижного контакта.

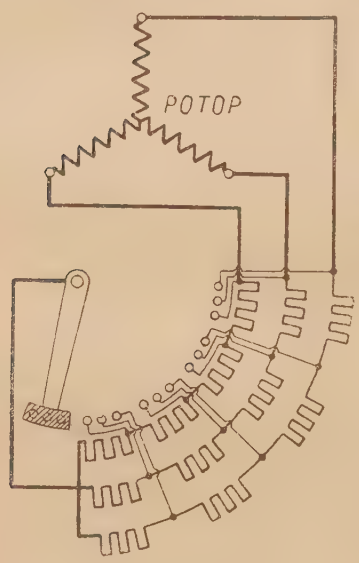
Положительная сторона этой схемы включения пускового реостата состоит в том, что все фазовые обмотки ротора нагружаются равномерно, и двигатель благодаря этому имеет возможность развить при пуске в ход максимальный крутящий момент.

Невыгодность же описанного устройства, однако, заключается в том, что здесь недостаточно полно используется объем, занимаемый реостатом, и материал ступенчатого переключателя. Как видно, при этом включении определенному числу ступеней реостата должно иметься для каждой фазовой цепи реостата соответствующее число контактов, т. е. число контактов трехфазного пускового реостата при данном включении получается в три раза бо́льшим, чем у реостата постоянного тока с тем же количеством пусковых ступеней.

В некоторых пусковых реостатах с целью уменьшения числа контактов ступенчатого переключателя, сопротивления отдельных цепей ротора, разбитые на ступени, включаются поочередно в общий

контактный ряд, и реостат снабжается одним общим подвижным контактом, или для пуска двигателя с трехфазным ротором используют пусковой реостат двухфазного ротора.

Оба эти способа, позволяющие осуществить довольно простое устройство пускового реостата, однако, не всегда могут быть использованы из-за неравномерности нагрузки отдельных фаз и применяются в настоящее время там, где не требуется строгого соблюдения последнего условия.

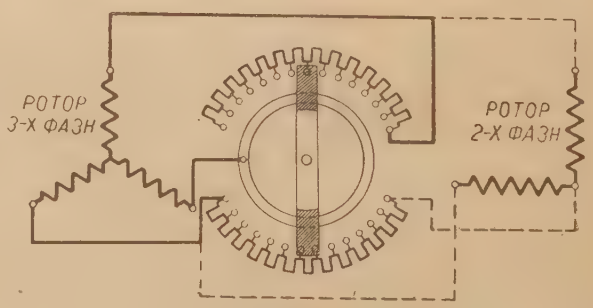


Фиг. 66.

На фиг. 66 приведена схема включения пускового реостата с поочередным включением отдельных ступеней сопротивления, впервые предложенное Каленбергом (Kahlenberg) и носящее его имя.

Как видно из фиг. 66, при повороте рычага пускового реостата ступени сопротивления отдельных фаз выводятся не одновременно во всех трех фазах, как на фиг. 65, а поочередно, почему при таком соединении последние ступени сопротивления следует выбирать относительно небольшими, во избежание образования в двигателе одноосного поля, при котором двигатель развивает при пуске лишь половинное число оборотов и потребляет большую реактивную мощность.

На фиг. 66 представлена схема с четырьмя ступенями сопротивления в каждой фазе. Если бы эти сопротивления соединить по схеме фиг. 65, то получилось бы только пять пусковых положений (включая нулевое) и потребовались бы на все три фазы 15 контактов. При включении же по схеме Каленберга, при том же количестве ступеней сопротивления в каждой фазовой цепи, возможно получить 13 пусковых ступеней, причем для этого потребовалось бы 12 контактов на все три фазовые цепи.

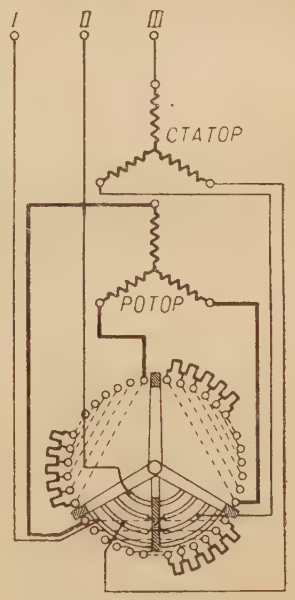


Фиг. 67.

В случае применения двухфазного пускового реостата для пуска асинхронных двигателей с трехфазным ротором число контактов ступенчатого переключателя получается меньшим на $^1/_3$, нежели при обычной схеме (фиг. 65).

На фиг. 67 представлена схема включения двухфазного реостата в случае двухфазного и трехфазного роторов. При использовании этого реостата для трехфазного ротора один конец фазовой обмотки присоединяется к кольцу, а концы двух других фазовых обмоток ротора — к зажимам крайних контактов, как это показано на фиг. 67 сплошными линиями.

Как уже говорилось, включение по системе Каленберга и только что описанное возможно применять с успехом во всех тех случаях, когда может быть допущена неравномерная нагрузка отдельных фазовых цепей двигателя.



Фиг. 68 *a*.

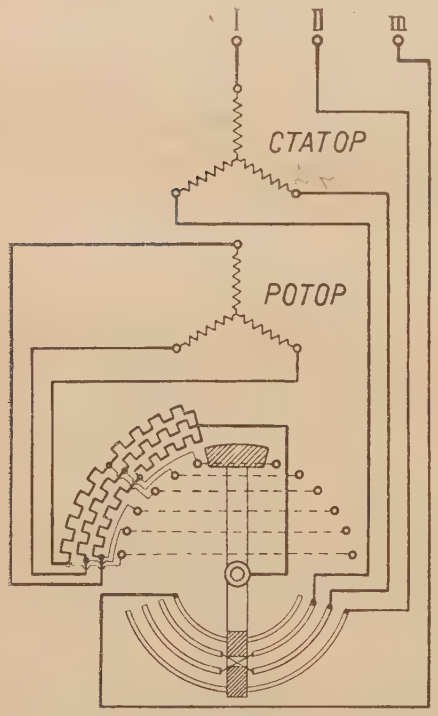
Изменение направления вращения асинхронного двигателя обычно осуществляется переключением двух каких-либо фазовых цепей тока, подводящих к статору двигателя. Устройство для такого переключения фаз может быть помещено в корпусе пускового реостата, вводимого в цепь ротора двигателя, причем тому или иному направлению вращения двигателя соответствует движение рычага пускового реостата в ту или иную сторону от нулевого положения. Реостаты должны для реверсивных двигателей иметь для каждого направления вращения отдельный ряд контактов, соединенных со ступенями пусковых сопротивлений. На фиг. 68 *a* представлена схема включения пускового реостата с одинаковыми фазовыми сопротивлениями, а на фиг. 68 *b* — схема включения по системе Каленберга.

Если, однако, не требуется часто изменять направление вращения асинхронного двигателя или то же самое двигателей постоянного тока, то более рациональным и дешевым устройством является применение обыкновенного пускового реостата, требующего вдвое меньшее число контактов, а для переключения направления тока или перемены фаз — специального рубильника, находящегося вне реостата.

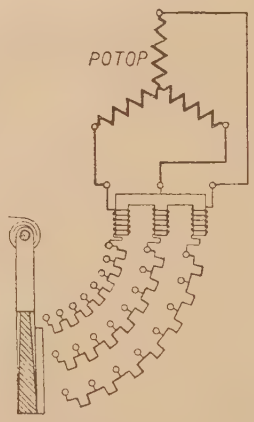
Применяющиеся для реостатов постоянного тока предохранительные электромагниты, описанные в общих чертах выше, на случай спадания напряжения сети или чрезмерных перегрузок двигателя, могут быть по

своей идее перенесены и на предохранительные устройства для асинхронных двигателей.

Для выключения асинхронных двигателей при снижении или полном исчезновении напряжения сети применяют электромагнит, удерживающий рычаг пускового реостата и, приключающийся непосредственно или через дополнительное сопротивление к сети рабочего напряжения. Такое устройство не является, однако, удобным в случае высоковольтных двигателей, и в данных случаях приходится применять для питания электромагнитов понижающие трансформаторы или предпочитают действовать через роторную цепь тока, где имеется обычно сравнительно низкое напряжение. Ввиду низкой, однако, частоты тока в роторе двигателя однофазный электромагнит не может держать своего сердечника, поэтому приходится применять трехфазные электромагниты, сила притяжений сердечника в которых постоянна даже и при очень незначительных частотах (фиг. 69).



Фиг. 68 *b*.



Фиг. 69.

Для предохранения асинхронных двигателей от перегрузки применяются, как и в двигателях постоянного тока, максимальные электромагниты, прекращающие действие двигателя, если нагрузка его превосходит известные пределы. Хотя роторный ток более подходящ для оценки нагрузки реостата двигателя, чем ток статора, включающий в себя намагничивающий ток (ток холостого хода), но вследствие низкой

частоты первого тока включение максимального электромагнита в цепи ротора не применяется. Максимальные электромагниты, таким образом, вводятся в цепь статора; так как нагрузка всех трех фаз при нормальных условиях равна, то достаточно применять один электромагнит, включая его в одну из трех цепей, подводящих ток к статору.

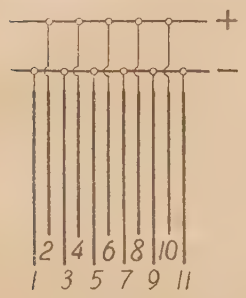
§ 21. Включение пусковых жидкостных реостатов постоянного и переменного тока.— Пусковые жидкостные реостаты по способу включения и управления можно разделить на две основные группы: 1) реостаты с перемещающимися электродами и неподвижным уровнем жидкости и 2) реостаты с перемещающимся уровнем жидкости и неподвижными электродами. Последний вид реостатов применяется в случае больших поглощаемых пусковых мощностей, когда электроды получаются тяжелыми и неудобными для перемещения.

Сосуды для электродов применяются как изолированные, так и неизолированные, отлитые из чугуна, или сделанные из клепаного железа, причем в последнем случае расстояние между стенками сосуда и электродами должно быть достаточно большим во избежание образования больших сил тока, замыкающегося через стенки сосуда и вызывающих неравномерную нагрузку отдельных фаз реостата.

В начале пуска, когда пусковой реостат должен иметь наибольшее сопротивление, электроды погружены в жидкость только частью своей поверхности; по мере необходимости уменьшения сопротивления пускового реостата поверхности электродов должны погружаться в жидкость или уровень жидкости подниматься вверх до тех пор, пока сопротивление не достигнет такого значения, при котором без появления больших толчков тока, реостат может быть замкнут накоротко при помощи какого-либо контактного металлического приспособления.

При больших пусковых мощностях и низких напряжениях сети или на кольцах ротора асинхронного двигателя, т. е. когда пусковой реостат должен иметь сравнительно малое сопротивление, ставят обычно несколько параллельно включенных электродных пластин с равномерным чередованием полярности или фаз, при этом при постоянном токе в жидкостных реостатах с несколькими параллельными электродами обычно берут на один полюс пластин на одну больше, чем на другой, т. е. между $n+1$ пластинами одного полюса вводят n пластин другого. Такое приключение имеет ту выгоду, что крайние пластины имеют одну и ту же полярность, благодаря чему имеется возможность не относить далеко стенки сосуда от электродов. Особенно заметно преимущество такого включения при трех электродных пластинах, так как с прибавлением третьего электрода рабочая поверхность электродов увеличивается вдвое при том же приблизительно, а иногда и меньшем, объеме сосуда, так как с введением третьего электрода

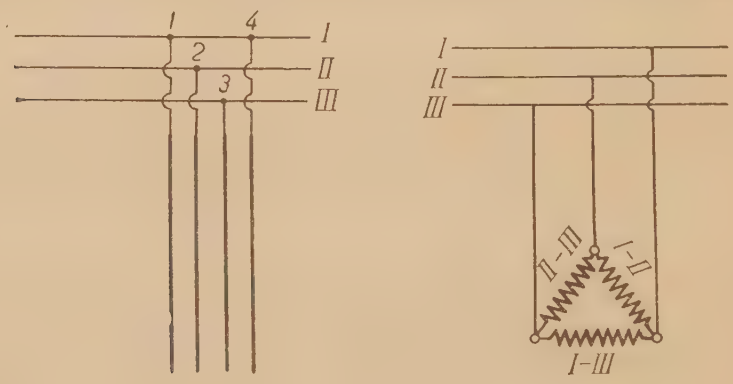
хотя увеличивается пространство, занимаемое активной жидкостью (находящейся между пластинами), но зато стенки сосуда, если он не изолирован изнутри, могут быть значительно приближены к электродам.



Фиг. 70.

При трехфазном токе, когда все пластины, приключенные к разным фазам, погружаются в общий сосуд, т. е. при включении треугольником, для соблюдения равномерности нагрузки отдельных фаз реостата и ротора двигателя, необходимо брать общее число электродов, равное $3n+1$ (где n число пластин приключенных к одной фазе).

Необходимость приключения одной еще пластины, кроме $3n$, ясна из фиг. 71, где представлена схема включения с четырьмя электродными пластинами ($n=1$). Четвертый электрод, как видно, приключен к той же фазе, что и первый, благодаря чему получается равномерная нагрузка отдельных фазовых цепей реостата. В самом деле, на фиг. 71 сопротивление стороны эквивалентного треугольника, обозначенной цифрами I—III создается введением четвертого электрода, который позволяет использовать вторую половину электрода третьей фазы, четвер-



Фиг. 71.

тый электрод, будучи присоединен к первой фазе, образует как бы вторую половину поверхности первого электрода. Таким образом, благодаря четвертому электроду, получается равноактивное участие обеих поверхностей у каждого из первых трех электродов.

Звездообразное включение электродов пускового жидкостного реостата можно осуществить посредством применения трех изолированных друг от друга сосудов, в каждый из которых может погружаться один или несколько параллельно включенных электродов. Электроды, погружающиеся в отдельные сосуды, замыкаются между собою

общей шиной, образуя таким образом нулевую точку сопротивлений реостата. Концы же проводов трех фаз, идущих от контактных колец ротора асинхронного двигателя, присоединяются к трем изолированным друг от друга сосудам.

Приведение в действие жидкостных реостатов может производиться или вручную, или при помощи электродвигателя, пристроенного обычно тут же при пусковом реостате в виде вспомогательной установки. В больших пусковых реостатах часто применяют автоматические приспособления для пуска, в виде моторного реле. Действие автоматического моторного реле заключается в основном в следующем: система подвижных электродов или заслонки, перемещающей уровень жидкости, тщательно уравновешивается при помощи противовеса; вал, при помощи которого вращаются подвижные электроды или заслонка, сцеплен с валом моторного реле, представляющего собою обыкновенный небольшой асинхронный двигатель. При нормальной силе пускового тока крутящий момент на валу реле, присоединенного обычно через трансформатор тока к сети, питающей главный двигатель, должен быть таковым, чтобы держать в равновесии подвижную систему; если ток в сети начинает спадать, то и спадает ток в цепи моторного реле, крутящий момент, следовательно, уже недостаточен, чтобы удерживать электроды, и они погружаются благодаря этому в жидкость, ток снова возрастает и т. д.; таким образом получается плавный автоматический пуск в ход асинхронного двигателя при помощи моторного реле.

Предохранительные устройства на случай снижения или полного исчезновения напряжения сети и на случай перегрузки двигателя при жидкостных пусковых реостатах устраиваются очень редко, а обычно выносятся в виде отдельных реле, которые действуют непосредственно на главный выключающий рубильник.

*

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ.

РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПУСКО-РЕГУЛИРУЮЩИЕ РЕОСТАТЫ.

*

§ 22. Классификация и особенности конструкции регуляторов возбуждения.— Реостаты, включаемые в цепь возбуждения электрических машин, называются вообще регуляторами возбуждения. Регуляторы возбуждения предназначаются: 1) для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора или в сети, питаемой генератором, 2) для изменения напряжения в известных пределах (например в зарядных или дополнительных аггрегатах), 3) для поддержания постоянной силы тока при изменяющемся напряжении.

Реостаты, служащие для регулировки напряжения электрических генераторов и преобразователей называются регуляторами напряжения.

Реостаты, включаемые в цепь возбуждения электродвигателей с целью регулировки скорости вращения путем изменения силы тока возбуждения, называются скоростными регуляторами возбуждения.

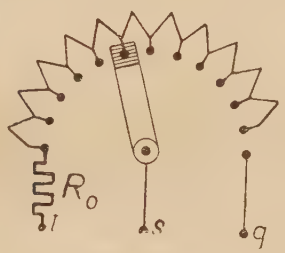
Наиболее употребительные типы регуляторов возбуждения по своему конструктивному выполнению сходны с пусковыми реостатами с воздушным охлаждением; обычно необходимые контакты переключателя этих реостатов расположены в одной плоскости. Род и форма материалов для сопротивлений, выполнение рам или фарфоровых цилиндров, контакты и щетки остаются одинаковыми в обоих случаях. С внешней стороны регуляторы возбуждения отличаются от пусковых реостатов главным образом устройством контактного ряда, что видно из фиг. 72, на которой изображен регулятор возбуждения с ручным управлением при помощи рукоятки. Поэтому все замечания, сделанные ранее относительно способов выполнения отдельных деталей пусковых реостатов, целиком относятся и к регуляторам возбуждения. Некоторые регуляторы возбуждения снабжаются особыми крышками, предохраняющими от возможности соприкосновения с контактами.

Управление регуляторами возбуждения может быть или непосредственное при помощи рукоятки или на расстоянии посредством цепной передачи или шарнирных соединений.

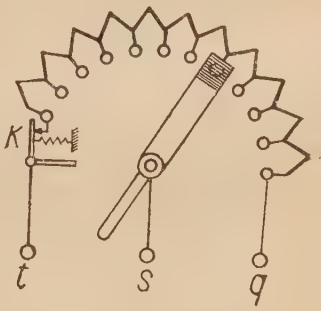
Регуляторы возбуждения для малых машин часто монтируются на общей чугунной раме вместе с предохранителями и соответствующими измерительными приборами. Такие регуляторы строятся только для непосредственного ручного управления.

§ 23. Схемы включения регуляторов возбуждения.— Шунтовые регуляторы для генераторов постоянного тока выполняются обычно по схеме, изображаемой на фиг. 73, с коротко-

Фиг. 72.

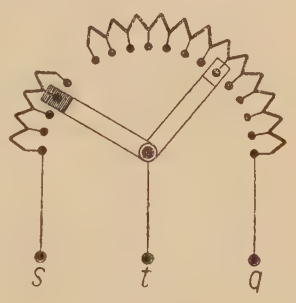


Фиг. 73.



Фиг. 74.

замыкающим контактом, тогда как для случаев регулировки в широких пределах предпочтение отдается другой схеме (фиг. 74), при которой сопротивление регулятора все время остается включенным на полное напряжение сети, а обмотка возбуждения включается параллельно регулируемой части сопротивления на зажимы s и q. Эта схема особенно удобна для регулировки возбуждения вольто-добавочных машин, так как при этом можно избежать слишком больших сопротивлений. Ключ k при нулевом положении контакта отсоединяет обмотку регулятора от сети.

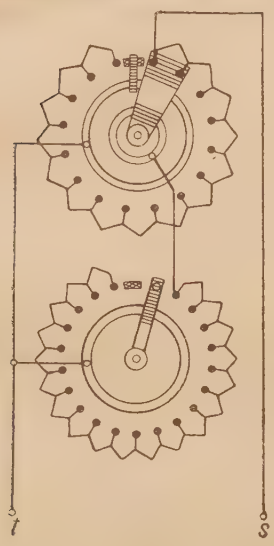


Фиг. 75.

Если желательно для более тонкой регулировки иметь возможно большое число ступеней, то применяют регуляторы с грубой и тонкой регулировкой (фиг. 75).

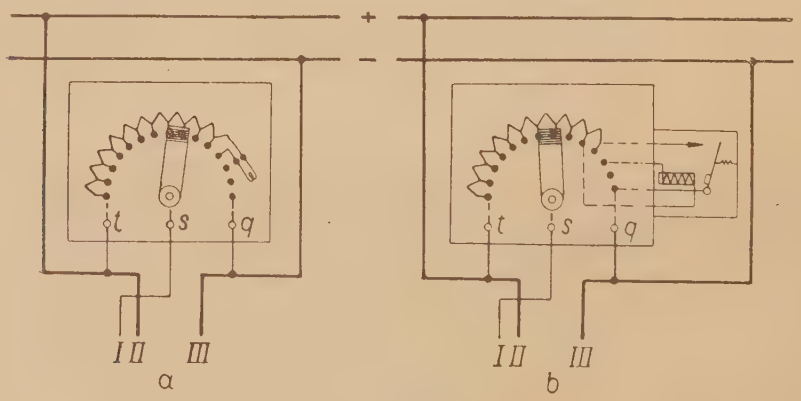
Пусть, например, регулятор имеет 20 ступеней для грубой регулировки и 10 ступеней для тонкой, чему соответствует число контактов 21 и 11, тогда с помощью такого регулятора можно получить $11 \times 21 = 231$ ступеней регулировки. При этом сопротивление каждой ступени для грубой регулировки выбирается так, чтобы оно равнялось сопротивлению 10 ступеней для части реостата тонкой регулировки.

Недостаток такого способа регулировки заключается в изменчивости процесса регулирования, а именно, когда рукоятка для тонкой регулировки занимает свое конечное положение, приходится переводить рукоятку для грубой регулировки на один контакт дальше, а затем возвращать рукоятки для тонкой регулировки в ее начальное положение, чтобы компенсировать скачок силы тока, получающийся при переводе рукоятки для грубой регулировки на следующий контакт.



Фиг. 76.

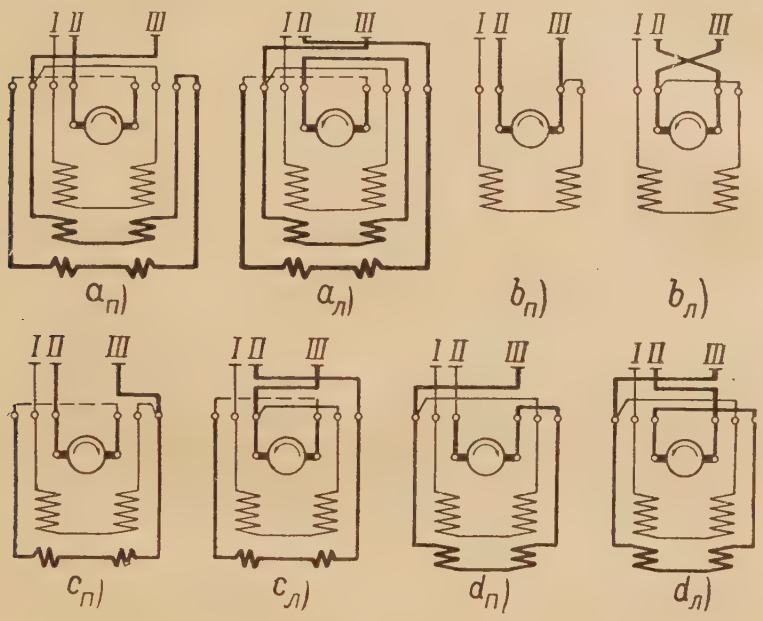
От этого недостатка свободен регулятор, выполненный по схеме фиг. 76. Здесь ступени для тонкой регулировки, изображенные внизу чертежа, всегда включены параллельно ступени, на контакте которой находится подвижной контакт с рукояткой для грубой регулировки. Рукоятки обеих частей регулятора соединены между собою посредством передачи так, что после одного полного оборота рукоятки для тонкой регулировки, рукоятка для грубой регулировки перемещается скачком на следующий контакт. В этом случае число ступеней регулировки также равно произведению из чисел ступеней для грубой и тонкой регулировки.



Фиг. 77.

На фиг. 77 представлены схемы присоединения регуляторов возбуждения к зажимам шунтового и компаунд-генераторов постоянного тока, причем на фиг. 77*a* изображена схема регулятора с катушкою для выдувания дуги, а на фиг. 77*b* — с магнитным искрогасителем. Фиг. 78 *a* — *d* представляют схемы соединения обмоток для генерато-

ров постоянного тока; здесь же соответственно обозначены зажимы машин, к которым присоединяется внешняя цепь и регулятор возбу-

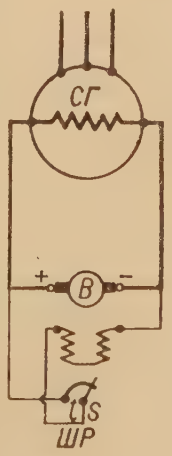


Фиг. 78.

ждения. Фиг. 78 *a* относится к компаунд-генератору с дополнительными полюсами; 78 *b* — к шунтовому генератору без добавочных полюсов; фиг. 78 *c* — к шунтовому генератору с добавочными полюсами; фиг. 78 *d* — к компаунд-генератору без добавочных полюсов.

Индексы *п* и *л* на фиг. 72 *a* — *d* означают схемы соединения для правого и левого вращения генератора. Провода, ведущие от реостата к генератору (фиг. 77 *a*, *b*) и от генератора к реостату (фиг. 78 *a* — *d*), обозначены соответственно цифрами I, II, III.

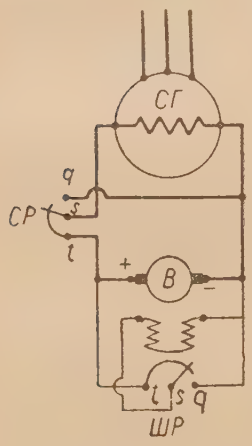
b. Регуляторы возбудителей синхронных машин. Схема соединений для данного случая изображена на фиг. 79, где означают: *СГ* — синхронный генератор, *В* — возбудитель, *ШР* — шунтовый регулятор. Эти же обозначения сохраняются и на фиг. 80—82, где, кроме того, обозначают: *СР* — регулятор главной цепи возбуждения синхронного генератора и *ДС* — градуированное добавочное сопротивление.



Фиг. 79.

При соединении по схеме фиг. 79 напряжение генератора регулируется исключительно изменением возбуждения возбудителя,

каковое производится от руки при помощи регулятора, включенного в шунтовую обмотку возбуждения возбудителя. Напряжение синхронного генератора путем изменения напряжения возбудителя может быть понижено до 80% от номинального при помощи тонкой регулировки регулятора и на 50% при помощи грубой регулировки. При этом напряжение возбудителя не остается постоянным, а изменяется в отношении 1 : 5, например, от 20 до 110 *V*. Поэтому в данном случае сети сигнального освещения и вспомогательных устройств нельзя питать от возбудителя.

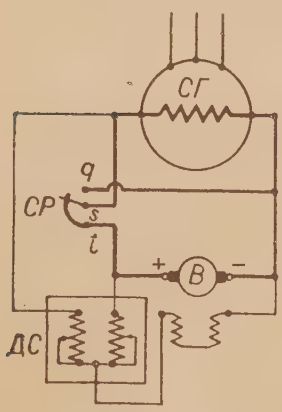


Фиг. 80.

Эта же схема может быть применена и для синхронных двигателей с самопуском, так как при этом обмотка ротора все время остается замкнутой на обмотку якоря возбудителя, что препятствует появлению высокой трансформаторной электродвижущей силы в цепи возбуждения, изоляция которой при этом может быть рассчитана на низкое напряжение.

Выполнение регуляторов для данной схемы такое же, как и для случая *a*.

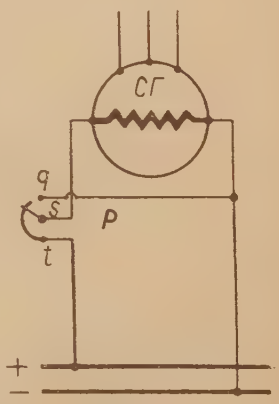
c. Регуляторы главной цепи возбуждения синхронных машин. Схемы соединений для данной группы регуляторов, которые включаются непосредственно в цепь тока возбуждения синхронной машины, приведены на фиг. 80 — 82.



Фиг. 81.

Так как в настоящем случае напряжение возбудителя можно поддерживать постоянным, то такой способ регулировки применяется главным образом в следующих случаях:

a) когда сети сигнального освещения и вспомогательных устройств питаются током возбудителя,



Фиг. 82.

b) когда возбудитель питает обмотки возбуждения нескольких генераторов и

c) когда обмотка возбудителя генератора присоединена к сети постоянного тока с постоянным напряжением (фиг. 82).

Регулировка напряжения синхронного генератора во всех этих случаях производится при помощи главного регулятора *СР*, а напряжение возбудителя поддерживается постоянным или при помощи шунтового регулятора *ШР* (фиг. 80) или при помощи добавочного сопротивления *ДС* (фиг. 81), если каждый генератор снабжен отдельным возбудителем.

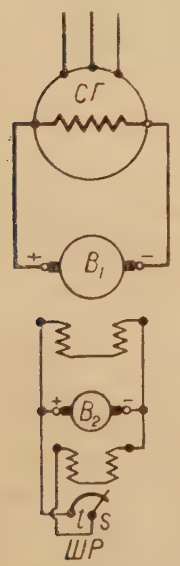
При помощи регуляторов данного типа можно производить тонкую регулировку напряжения генератора, понижая его до 80% от номинального, с точностью до $\pm 1\%$. Кроме того, передвинув рукоятку для грубой регулировки приблизительно на пять контактов, можно понизить напряжение генератора на 50%.

Если цепь возбудителя синхронного генератора присоединена к источнику тока, напряжение которого E выше, чем номинальное напряжение возбудителя E_m, то регулятор должен быть рассчитан на некоторую большую кажущуюся мощность P', определяемую по формуле

$$P' = (2{,}5 \frac{E}{E_m} - 1{,}5).\ P\ kW,$$

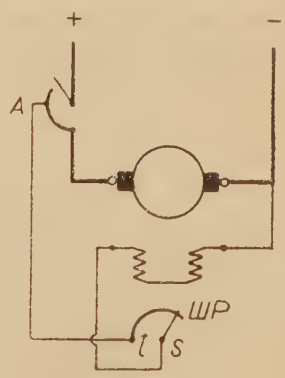
где P — номинальная мощность цепи возбуждения генератора.

d. Каскадный способ регулировки напряжения синхронных генераторов состоит, как видно из схемы фиг. 83, в том, что изменение напряжения генератора *СГ* достигается изменением напряжения возбудителя B_1, имеющего постороннее возбуждение от второго возбудителя B_2. С этой целью приходится соответствующим образом изменять напряжение возбудителя B_2, для чего в цепь его шунтовой обмотки возбуждения включается регулятор *ШР*.



Фиг. 83.

Преимущество такого способа возбуждения синхронных генераторов заключается в том, что, во-первых, регулятор возбуждения *ШР* в данном случае рассчитывается на значительно меньшую мощность, чем при обычном способе возбуждения, и, во-вторых, в случае коротких замыканий генератора, устраняется возможность перемагничивания.



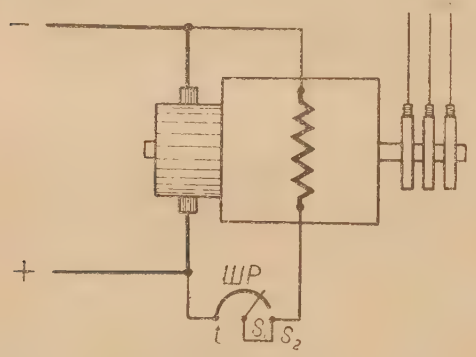
Фиг. 84.

e. Шунтовой регулятор возбуждения для двигателей постоянного тока включается по схеме фиг. 84, где *ШР* — регулятор возбуждения и *A* — пусковой реостат. Регуляторы возбуж-

дения для двигателей включаются последовательно в цепь возбуждения и выполняются так, чтобы при наличии тока в цепи якоря двигателя цепь возбуждения последнего ни в коем случае не могла быть разомкнута.

f. Шунтовые регуляторы возбуждения для одноякорных преобразователей переменного тока в постоянный присоединяются по схеме, изображенной на фиг. 85.

g. Регуляторы возбуждения для мотор-генераторов ничем не отличаются от таковых же для соответствующих двигателей или, смотря по обстоятельствам, для генераторов, вследствие чего и схемы соединения их остаются прежними для каждого соответствующего случая.



Фиг. 85.

Фиг. 86.

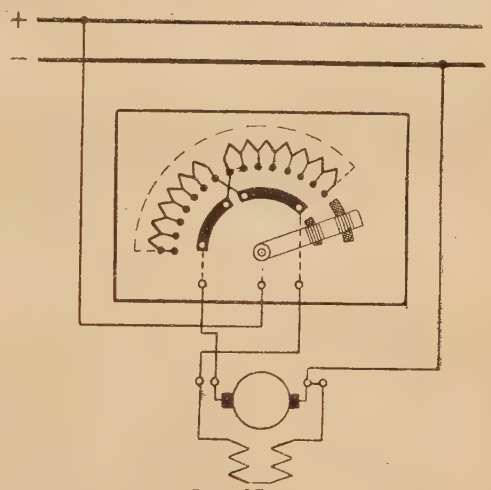
§ 24. Пуско-регулирующие реостаты. — Пуско-регулирующие реостаты представляют собою комбинацию из пускового реостата и регулятора возбуждения и как по внутреннему своему устройству, так и по внешнему виду вполне схожи с вышеупомянутыми аппаратами. К ним также относится все сказанное ранее о выполнении пусковых реостатов. В отличие от регуляторов возбуждения пуско-регулирующие реостаты, так же как и пусковые, обычно снабжаются крышками, предохраняющими от соприкосновения с контактами. На крышке реостата отмечаются положения рукоятки, соответствующие пуску в ход и регулировке возбуждения машины, причем на контактах, соответствующих регулировке возбуждения, рукоятка реостата может оставаться в течение любого промежутка времени.

На фиг. 86 изображен внешний вид пуско-регулирующего реостата, а на фиг. 87 дана схема соединения для случая шунтового двигателя постоянного тока. Пуско-регулирующие реостаты для шунтовых и сериес-двигателей позволяют понижать до 75 %, а для шунтовых двигателей, кроме того, и повышать число оборотов, путем ослабления

поля двигателя, на 15%, 50%, 100% или 200% от номинальной скорости вращения двигателя при условии, что крутящий момент или мощность остаются постоянными за все время процесса регулировки.

Если с возрастанием скорости двигателя крутящий момент увеличивается, то пуско-регулирующие реостаты рассчитываются на повышение скорости до 15%, а на понижение — до 50%.

В случае асинхронных двигателей с контактными кольцами при помощи пуско-регулирующих реостатов можно понижать число оборотов на 25, 50 или 75% от номинального, при этом сопротивление реостата рассчитывается так, чтобы вышеупомянутая регулировка была возможна еще при пониженном крутящем моменте, составляющем около 80% от номинального. При еще меньших значениях крутящего момента пределы регулировки соответственно уменьшаются. Следует отметить, что при пониженном числе оборотов двигатель не может долго поддерживать полный номинальный крутящий момент, поэтому в тех случаях, когда по условиям работы двигателя требуется понижение его скорости вращения в течение длительного промежутка времени, приходится ставить двигатель большей мощности.



Фиг. 87.

Как уже было упомянуто, в случае понижения числа оборотов двигателя, постоянство их сохраняется только при постоянстве крутящего момента. Чем больше уменьшение числа оборотов и чем меньше крутящий момент, тем большие наблюдаются колебания числа оборотов при изменениях крутящего момента двигателя.

Пуско-регулирующие реостаты для шунтовых двигателей могут быть выполнены также и автоматическими, причем регулятор возбуждения в течение периода пуска остается коротко замкнутым, в дальнейшем регулировка возбуждения может происходить или автоматически или от руки.

Пуско-регулирующие реостаты могут быть также и жидкостными, но такие реостаты не являются нормальными типами, а рассчитываются для каждого случая особо.

*

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ОДНОРОДНЫХ ТЕЛ

ГЛАВА ПЯТАЯ

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ОДНОРОДНЫХ ТЕЛ

*

Если к некоторому телу каким-либо образом подводить энергию, которая в этом теле превращается в тепло, то часть тепловой энергии остается в нем, вызывая повышение температуры его (в зависимости от дальнейшего поглощения энергии), а другая часть отдается окружающей среде, вследствие лучеиспускания, конвекции и теплопроводности.

Для получения правильного представления об этих процессах ниже рассматриваются все явления в отдельности, и затем полученные результаты исследования соответствующим образом связываются между собою.

§ 25. Основные законы теплоотдачи. *a.* Лучеиспускание. Энергия, отдаваемая лучеиспусканием, определяется по закону Стефана-Больцмана (Stefan-Boltzmann), выражаемому математически следующей формулой:

$$A_s = o_s \cdot S_s [\theta_2^4 - \theta_1^4]\, t \ Joule, \qquad 1$$

где:

o_s — постоянная лучеиспускания,

S_s — поверхность теплоизлучения в cm^2,

θ_2 — абсолютная температура поверхности тела в ° Кельвина (Kelvin),

θ_1 — абсолютная температура среды, окружающей тело, в ° Кельвина,

t — время, выраженное в *sec.*

Из формулы следует, что тепловая мощность, излучаемая поверхностью нагретого тела, равняется:

$$P_s = o_s \cdot S_s [\theta_2^4 - \theta_1^4] \ Watt. \qquad 2$$

Для абсолютно черного тела

$$o_s = 5{,}36 \cdot 10^{-12} \frac{Watt}{cm^2 (°K)^4}.$$

Если вместо абсолютных температур применить температуры, выраженные в ° Цельсия (Celsius), то формула приобретает следующий вид:

$$P_s = o_s \cdot S_s [(\vartheta_2 + 273)^4 - (\vartheta_1 + 273)^4] \; Watt. \qquad 3$$

Последняя формула, однако, для практических вычислений не применяется, вследствие сложности возведения в четвертую степень значений температур, и она заменяется несколько упрощенной, дающей достаточно точные для практики результаты, а именно:

$$P_s = o_s \cdot S_s (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot k \cdot 10^6 \; Watt. \qquad 4$$

Если за нормальную температуру окружающей среды принять $\vartheta_1 = 20° C$ и $\vartheta_2 - \vartheta_1 = \tau$, то коэффициент k находится из равенства:

$$(\tau + 293)^4 - 293^4 = \tau \cdot 10^6 \cdot k = (\vartheta_2 - \vartheta_1) \cdot 10^6 k_{20} = \tau^4 + 1172\tau^3 + 515094\tau^2 +$$
$$+ 100615028\tau = \tau \cdot 10^{-6} (10^6 \tau^3 + 0{,}001172\tau^2 + 0{,}515094\tau + 100{,}615028)$$

или после округления

$$(\tau + 293)^4 - 293^4 = \tau \cdot 10^6 \; (100 + 0{,}5151\tau + 0{,}001172\tau^2 + 10^{-6}\tau^3).$$

Таким образом

$$P_s = o_s \cdot S_s (\vartheta_2 - \vartheta_1) k_{20} \cdot 10^6 = o_s \cdot S_s \cdot \tau \cdot k_{20} \cdot 10^6 \; Watt,$$

а

$$k_{20} = 100 + 0{,}5151\tau + 0{,}001172\tau^2 + 10^{-6}\tau^3. \qquad 5$$

Значения k_{20} для различных τ приведены в таблице 14 а.

Таблица 14 а

τ°	0	50	100	150	200
k_{20}	100	128,81	164,23	207,01	257,90

Зависимость k_{20} от τ можно выразить с достаточной для практических целей точностью следующими формулами:

а) для $\tau = 0 \div 100° C$,

$$k_{20} = 100 + 0{,}6\tau;$$

$$b) \text{ для } \tau = 100 \div 200^\circ C,$$

$$k_{20} = 90 + 0{,}8\tau.$$

Для электрических приборов и аппаратов за нормальную допустимую температуру окружающей среды принимают $\vartheta_1 = 35^\circ C$. Для этого значения ϑ_1 коэффициент k (см. формулу 4) находится из равенства:

$$k_{35} = \tau \cdot 10^6 = (\tau + 308)^4 - 308^4 = \tau^4 + 4 \cdot 308 \cdot \tau^3 + 6 \cdot 308^2 \tau^2 + 4 \cdot 308^3 \tau =$$
$$= \tau \cdot 10^6 (116{,}87 + 0{,}5692\tau + 0{,}001232\tau^2 + 10^{-6}\tau^3). \qquad 6$$

Значения коэффициента k_{35} для нормальных допустимых повышений температуры различных частей реостатов указаны в таблице 14 b.

Таблица 14 b

τ^0	40	50	55	60	65	80	125	150	175
k_{35}	142,7	149,4	15[illegible],5	156,4	161,8	171,3	226,8	263,7	307,6

Что касается постоянной лучеиспускания o_s, то ее значения зависят от рода тела и состояния его поверхности. Таблица 15 дает представление о значениях постоянной o_s.

Таблица 15

Род тела	Состояние поверхности	o_s в $\frac{W}{cm^2(^\circ K)^4}$	o_s в %
Абсолютно черное тело . .	—	$5{,}36 \cdot 10^{-12}$	100
Чугун	шероховатая, темного цвета	$4{,}5 \cdot 10^{-12}$	84,0
Железо	матовая; оксидированная	$5{,}11 \cdot 10^{-12}$	95,3
» »	чистая	$1{,}86 \cdot 10^{-12}$	34,7
» »	хорошо полированная	$1{,}54 \cdot 10^{-12}$	28,7
Латунь, медь	матовая	$1{,}2 \cdot 10^{-12}$	22,4
» »	полированная	$0{,}917 \cdot 10^{-12}$	17,1
Обмотки	покрашенная в темный цвет	$4{,}56 \cdot 10^{-12}$	85,0
Мрамор	матовая, полированная	$3{,}13 \cdot 10^{-12}$	58,4
Шифер	» »	$3{,}82 \cdot 10^{-12}$	71,3

В среднем можно принять: для матовых, темных металлических поверхностей $o_s \cong 4{,}5 \cdot 10^{-12} \frac{W}{cm^2(^\circ K)^4}$; для хорошо полированных металлических поверхностей $o_s \cong 1{,}2 \div 1{,}5 \cdot 10^{-12} \frac{W}{cm^2(^\circ K)^4}$; для слабо полированных и гладких металлических поверхностей

$$o_s \cong 2 \cdot 10^{-12} \frac{W}{cm^2(^\circ K)^4}.$$

b. Конвекция. — Конвекционная передача тепла характеризуется тем, что отвод тепла производится жидким или газообразным телом, соприкасающиеся частицы которого движутся по поверхности нагретого тела.

При естественном охлаждении движение частиц охлаждающей среды создается за счет нарушения равновесия отдельных частиц при нагреве их; при искусственном охлаждении движение жидкости или газа происходит принудительным образом.

Теплоотдача путем конвекции зависит от формы охлаждаемого тела (высоты его), от свойств охлаждающей среды и скорости движения последней.

На основании теоретических и экспериментальных исследований количество тепла, отводимое посредством конвекции в единицу времени, может быть определено по следующей формуле:

$$P_k = S_k \cdot \tau \cdot \sqrt{\lambda \cdot q \cdot \gamma \cdot \frac{v}{H}} \quad Watt, \qquad 7$$

где

S_k — поверхность конвекционного охлаждения в cm^2,

τ — повышение температуры в верхнем слое жидкости или газа в $^\circ C$,

q — теплоемкость в $\frac{Watt\ sec}{g\ ^\circ C}$,

γ — удельный вес в g/cm^3,

λ — теплопроводность жидкости или газа в $\frac{Watt}{^\circ C\ cm}$,

H — длина пути по поверхности тела, омываемого потоком движущейся жидкости или газа, в cm,

v — скорость движения потока в cm/sec.

При естественном охлаждении скорость движения потока v обычно бывает неизвестной, поэтому предыдущая формула не удобна для практического применения. В этом случае подсчет конвекционной теплоотдачи может быть произведен по формуле:

$$P_k = S_k \cdot \tau^{\frac{5}{4}} \left[\frac{q \cdot \gamma^2 \cdot \lambda^3 \cdot \alpha}{k_1 \cdot \eta \cdot H} \right]^{\frac{1}{4}} Watt. \qquad 8$$

В этой формуле означает:

α — температурный коэффициент объемного расширения газа или жидкости, выраженной в $^\circ C^{-1}$,

η — вязкость газа или жидкости, выраженная в $\frac{g \cdot sec}{cm^2}$.

k_1 — коэффициент, зависящий от свойства охлаждающей среды.

Последняя формула показывает, что при естественном охлаждении теплоотдача путем конвекции происходит пропорционально разности температур поверхности тела и среды в степени 1,25. Этот закон был установлен впервые еще Дюлонгом и Пти (Dulong et Petit) в 1817 г., которые чисто опытным путем нашли, что теплоотдача путем конвекции пропорциональна $\tau^{1,233}$. Последние работы Лоренца (Lorenz) подтвердили этот закон.

Для воздуха можно принять следующие значения:

$$q = 1 \frac{Watt \cdot sec}{^\circ C \cdot g},$$

$$\gamma = 0{,}0012 \frac{g}{cm^3},$$

$$\lambda = 0{,}00023 \frac{Watt}{^\circ C \cdot cm},$$

$$\alpha = \frac{1}{273} {}^\circ C^{-1},$$

$$\eta = 1{,}8 \cdot 10^{-7} \frac{g \cdot sec}{cm^2},$$

$$k_1 = 12 \frac{cm^2}{g}.$$

Таким образом для естественного воздушного охлаждения теплоотдача посредством конвекции, вычисляемая по формуле 8, приобретает следующий вид:

$$P_{kl} = 4{,}8 \cdot S_k \frac{\tau^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \cdot 10^{-4} \ Watt,$$

или в более простом и удобном для расчетов виде

для $\tau = 50^\circ C$

$$P_{kl} = 11{,}0 \cdot S_k \frac{\tau}{H^{\frac{1}{4}}} \cdot 10^{-4} \ Watt, \qquad 9$$

для $\tau = 125^\circ C$

$$P_{kl} = 13{,}8 \cdot S_k \frac{\tau}{H^{\frac{1}{4}}} \cdot 10^{-4} \ Watt, \qquad 9'$$

для $\tau = 175° C$

$$P_{kl} = 17{,}5 \cdot S_k \frac{\tau}{H^{\frac{1}{4}}} \cdot 10^{-4} \ Watt. \qquad 9''$$

Для масла:

$$q = 1{,}8 \frac{Watt \cdot sec}{° C \cdot g},$$

$$\gamma = 0{,}91 \frac{g}{cm^3},$$

$$\lambda = 0{,}00165 \frac{Watt}{° C \cdot cm},$$

$$\alpha = 0{,}00069° C^{-1},$$

$$\eta = \frac{0{,}29}{\tau^3} \frac{g \cdot sec}{cm^2}.$$

$$k_1 = 144 \frac{cm^2}{g}.$$

На основании этих данных выражение для конвекционной теплоотдачи при естественном охлаждении металлических тел в масляной ванне получается таким:

$$P_{ko} = 3{,}7 S_k \cdot \frac{\tau^2}{H^{\frac{1}{4}}} \cdot 10^{-4} \ Watt. \qquad 10$$

Формулы 9 и 10 применимы лишь для тех случаев, когда длина пути омывающего потока не превосходит $10 \div 15$ *cm*. При охлаждении больших поверхностей циркуляция газа или жидкости происходит отдельными потоками длиною не более 15 *cm*; в этих случаях, если принять $H = 15$ *cm*, расчетные формулы 9 и 10 могут быть заменены следующими:

a) для охлаждения воздухом

$$P_{kl} = 6{,}6 \tau \cdot S_k \cdot 10^{-4} \ Watt, \qquad 11$$

b) для охлаждения в масле

$$P_{ko} = 1{,}9 \cdot \tau^2 \cdot S_k \cdot 10^{-4} \ Watt. \qquad 12$$

c. Теплопроводность. Отвод тепла нагретого тела может происходить посредством теплопроводности охлаждающей среды. В этом случае тепловая мощность, передающаяся за счет проводимости

среды, прямо пропорциональна разности температур в начале и конце слоя τ, площади поперечного сечения слоя S_l и обратно пропорциональна длине слоя среды l; кроме того эта мощность зависит также и от свойств самой теплопроводящей среды, от ее коэффициента теплопроводности λ, т. е.

$$P_\lambda = \lambda \frac{\tau \cdot S_\lambda}{l} \; Watt. \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 13$$

Как было указано ранее, для воздуха

$$\lambda = 0{,}00023 \frac{Watt}{^\circ C \cdot cm},$$

а для масла

$$\lambda = 0{,}00165 \frac{Watt}{^\circ C \cdot cm}.$$

В практике обычно приходится иметь дело одновременно с двумя или тремя видами теплоотдачи, поэтому при расчетах применяются формулы, объединяющие все эти виды теплоотдач.

Так например в случае расчета охлаждения путем лучеиспускания и конвекции находит применение следующая формула:

$$P'_{sk} = o_{sk} S_{sk} (\vartheta_2 - \vartheta_1)(1 + \beta \sqrt{v}) \; Watt, \qquad 14$$

где

o_{sk} — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием и конвекцией,

v — скорость движения охлаждающего вещества в m/sec,

β — коэффициент, характеризующий теплоотдачу в зависимости от скорости.

В общем же виде, отдачу тепла лучеиспусканием, теплопроводностью и конвекцией можно объединить и с достаточной точностью производить подсчет сразу по формуле:

$$P = S \cdot \tau \cdot o \; Watt,$$

где o — коэффициент общей теплоотдачи.

Отсюда следует, что

$$\tau = \frac{P}{S \cdot o} = \frac{P}{S} \cdot C \qquad 15$$

причем $C = \frac{1}{o}$ — называется постоянной нагрева.

Значения коэффициентов o_{sk}, β и C приведены в таблицах 16 и 17.

Таблица 16

Род нагретого тела	σ_{3k}	β
Катушки электромагнитов (неподвижные)	$^1/_{300} \div {}^1/_{400}$	—
Голый медный провод, погруженный в масло	$^1/_{36}$	3
Изолированный медный провод, погруженный в масло	$^1/_{80}$	3
Голый медный провод в воде	$^1/_{24}$	3
Голый железный провод в масле	$^1/_{150}$	3
Голый железный провод в воде	$^1/_{100}$	3
Элементы сопротивления реостатов, погруженных в масло	$^1/_{50}$	—
» » » охлаждаемых воздухом	$^1/_{1100}$	—

Таблица 17

Род нагретого тела	C	S_k
Элементы сопротивления из никелиновой проволоки	150 ÷ 500	общая поверхность
Трубчатые сопротивления:		
вертикальные	150 ÷ 400	внешняя поверхность
горизонтальные	100 ÷ 300	внешняя поверхность
Чугунные сопротивления	1 000	общая поверхность
Пакетные сопротивления из никелина	100 ÷ 200	внешняя »
Масляные пусковые реостаты	500	поверхность кожуха

§ 26. Процесс нагрева тела.—*a*. При кратковременной нагрузке. —В том случае, если подводимое к однородному телу тепло целиком остается в нем, т. е. никакая часть тепла не отдается окружающей среде, то тепловой баланс выражается следующим простым уравнением

$$P \cdot dt = G \cdot q \cdot d\vartheta,$$

где

P — мощность в *Watt*,

t — время в *sec*,

G — вес тела в *g*,

q — удельная теплоемкость в $\frac{Joule}{g \cdot {}^\circ C}$,

ϑ — температура в $^\circ C$.

Отсюда следует, что за период времени t тело достигает температуры ϑ_2, равной

$$\vartheta_2 = \int_0^t \frac{P\,dt}{G\,q} - \vartheta_1.$$

Здесь ϑ_1 — означает температуру тела при $t = 0$.

Повышение же температуры тела $\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1$ за тот же период составляет

$$\tau = \frac{\int_0^t P\,dt}{G \cdot q} \qquad 16$$

Пусть это тело является, например, однородным проводником с сопротивлением $R\,Ohm$, удельным сопротивлением $\rho\,\frac{R\Omega\,mm^2}{m}$, поперечным сечением $s\,mm^2$, длиною $l\,m$, по которому протекает ток силой $I\,A$. Заменяя вес $G\,g$ проводника посредством его объема $v\,cm^3$ и удельного веса $\gamma\,\frac{g}{cm^3}$, получают:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = I^2\,\frac{\rho \cdot l}{s}\,dt = v \cdot \gamma \cdot q \cdot d\vartheta = s \cdot l \cdot \gamma \cdot q \cdot d\vartheta.$$

В общем виде для электрических проводников

$$\rho = \rho_o\,[1 + \alpha\vartheta],$$
$$q = q_o\,[1 + \sigma\vartheta].$$

В частном случае, когда $\alpha \cong 0$ и $\sigma \cong 0$, интегрирование предыдущего уравнения дает температуру ϑ, достигаемую телом за время t при условии, что I и R постоянны и начальная температура тела $\vartheta_1 = 0$,

$$\vartheta = \frac{I^2 \cdot \rho}{s^2 \cdot \gamma \cdot q} \cdot t = \left(\frac{I}{s}\right)^2 \frac{\rho}{\gamma \cdot q} \cdot t = i_s^2\,\frac{\rho}{\gamma q} \cdot t, \qquad 17$$

где $i_s = \frac{I}{s}$ означает плотность тока...

В случае, если начальная температура тела не равняется нулю, то вышеупомянутое выражение дает значение повышения температуры τ за тот же период времени t.

В общем повышение температуры в одну секунду можно определить посредством формулы:

$$\frac{d\tau}{dt} = i_s^2\,\frac{\rho}{\gamma \cdot q},$$

т. е. повышение температуры однородного тела в зависимости от времени прямо пропорционально квадрату плотности тока и удельному

сопротивлению и обратно пропорционально произведению из удельного веса и удельной теплоемкости тела.

Пример 1. Требуется рассчитать сопротивление для пускового реостата с воздушным охлаждением; сила тока, проходящая по сопротивлению, равняется $I = 50 A$; продолжительность нагрузки $t = 15$ *sec*; максимальное допустимое повышение температуры $\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1 = 175°$. Общее сопротивление реостата $R = 4{,}2\ \Omega$; материал, из которого выполнено сопротивление, — никелин, обладающий температурным коэффициентом сопротивления $\alpha = 0{,}22 \cdot 10^{-3}$, удельным весом $\gamma = 8{,}72\ \frac{g}{cm^3}$, удельной теплоемкостью $q = 0{,}093\ \frac{cal}{°C \cdot g} = 0{,}093 \cdot 4{,}189\ \frac{Joule}{°C \cdot g}$, удельным сопротивлением $\rho = 0{,}40\ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$ или $\rho = 0{,}40 \cdot 10^{-4}\ \Omega\ cm$.

Так как α очень мало, то можно считать, что сопротивление реостата остается постоянным при нагреве. Вследствие кратковременности действия тока ($t = 15$ *sec*), отдача тепла в окружающую среду почти не происходит, поэтому вся тепловая энергия, развиваемая током, идет на нагревание.

На основании формулы 16′ плотность тока находится:

$$i_s^2 = \frac{\tau}{t}\,\frac{\gamma \cdot q}{\rho} = \frac{175 \cdot 8{,}72 \cdot 0{,}093 \cdot 4{,}189}{15 \cdot 0{,}40 \cdot 10^{-4}} = 990826\ \frac{A^2}{cm^4}$$

$$i_s = \sqrt{990826} \cong 995\,\frac{A}{cm^2},$$

поперечное сечение проводника

$$s = \frac{I}{i_s} = \frac{50}{995} \cong 0{,}05\ cm^2 = 5\ mm^2,$$

длина проводников сопротивления

$$l = \frac{R \cdot s}{\rho} = \frac{4{,}2 \cdot 5}{0{,}40} = 52{,}5\ m.$$

Пример 2. Элементы сопротивления пускового реостата погружены в масло; объем масляного бака составляет $V_0 = 150\ l$. Двигатель пускается в ход в течение $t = 16$ *sec*, при этом средняя поглощаемая в реостате мощность равняется $P = 28\,000\ W$, а пусковой ток $I = 50\ A$. Требуется определить повышение температуры масла.

Вследствие относительно короткого промежутка времени пуска в ход можно считать, что отдача тепла наружу не происходит, и что вся тепловая энергия идет почти исключительно на нагрев масла. В таком случае среднее повышение температуры масла равно:

$$\tau = \frac{P \cdot t}{V_0 \cdot \gamma \cdot q}.$$

Для масла $\gamma = 0{,}9\ \frac{g}{cm^3}$; $q = 1{,}8\ \frac{Joule}{°C \cdot g}$.

Таким образом

$$\tau = \frac{28000 \cdot 16}{150 \cdot 10^3 \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}8} = 1{,}856°\ C.$$

Если допустить максимальное повышение температуры масла равным 80° C, то реостат может выдержать число непрерывных пусков в ход двигателя

$$Z = \frac{80}{1,856} \cong 43.$$

Для $I = 100$ A пусковое число получается равным $Z \cong 10$.

b. Общие уравнения нагревания. — Так как в действительности имеет место одновременное протекание обоих только что описанных процессов, то в этом случае уравнение теплового баланса может быть написано так: подведенное тепло = тепловому запасу + потери тепла, или подведенная энергия = поглощаемой энергии + отданная энергия

$$P\,dt = G \cdot q \cdot d\tau + S \cdot o \cdot \tau \cdot dt.$$

Интегрирование этого дифференциального уравнения дает:

$$t_2 - t_1 = t = \frac{G \cdot q}{S \cdot o} \left| \ln (P - S \cdot o \cdot \tau) \right|_{\tau}^{\tau_a}. \qquad 17'$$

Обозначив $\frac{G \cdot q}{S \cdot o} = T = Const$, получают

$$t = T \ln \frac{P - S \cdot o \cdot \tau_a}{P - S \cdot o \cdot \tau},$$

или после преобразований и подстановки $\frac{P}{o \cdot S} = \tau_m$

$$\tau = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_a \cdot e^{-\frac{t}{T}}; \qquad 18$$

здесь τ_a означает начальное повышение температуры над температурой окружающей среды в ° C, а e — основание натуральных логарифмов.

Для определения повышения температуры за данный промежуток времени t следует принять $\tau_a = 0$, и тогда повышение температуры

$$\tau = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \qquad 19$$

откуда нетрудно определить и время t:

$$t = T \ln \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau} = T \cdot 2,3 \lg \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau}. \qquad 20$$

С помощью полученных выше уравнений могут быть построены кривые нагрева тела, т. е. кривые зависимости повышения температуры τ от времени t.

Для получения уравнения кривых охлаждения достаточно в уравнении теплового баланса левую часть приравнять нулю:

$$0 = G\,q\,d\tau + S \cdot o \cdot \tau \cdot dt,$$

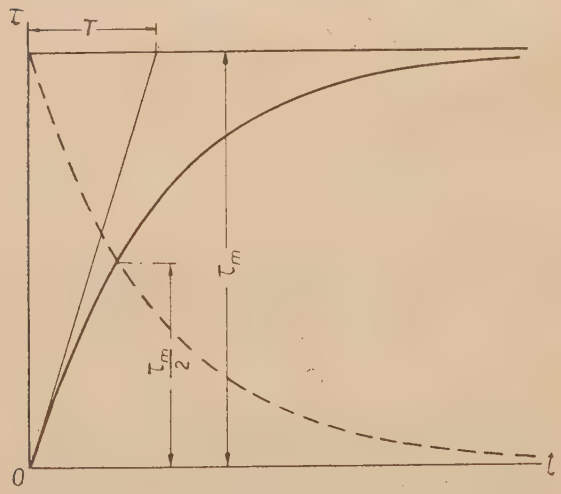
после чего при помощи аналогичных преобразований находятся выражения для понижения температуры:

$$\tau = \tau_m \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \qquad 21$$

и времени:

$$t = T \ln \frac{\tau_m}{\tau}. \qquad 22$$

Кривая охлаждения тела, нагретого первоначально на τ_m ° C выше температуры окружающей среды, является зеркальным изображением соответствующей кривой нагрева относительно оси, проведенной параллельно оси абсцисс через ординату, равную $\frac{\tau_m}{2}$. Кривые нагревания и охлаждения приведены на фиг. 88.



Фиг. 88.

Те же самые кривые дают зависимость температуры тела от времени, для чего следует только передвинуть ось абсцисс вниз на расстояние ϑ_o, где ϑ_o — начальная температура тела, совпадающая с температурой окружающей среды (фиг. 89).

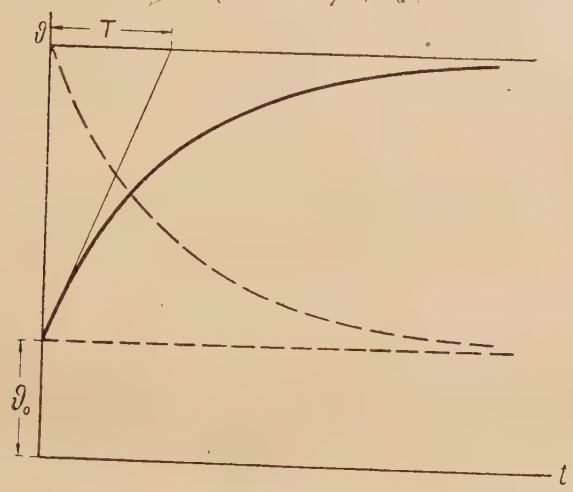
Если в момент времени $t = 0$ температура тела выше температуры окружающей среды, т. е. $\tau_a \neq 0$, то кривую нагрева для этого случая легко получить из кривой нагрева, построенной для случая, когда $\tau_a = 0$, для чего последнюю кривую, выражающуюся уравнением:

$$\tau = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

надо передвинуть в сторону отрицательных значений абсцисс до пересечения ее с осью ординат в точке τ_a (фиг. 90).

Действительно, если в уравнение

$$\tau = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_a \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$



Фиг. 89.

подставить

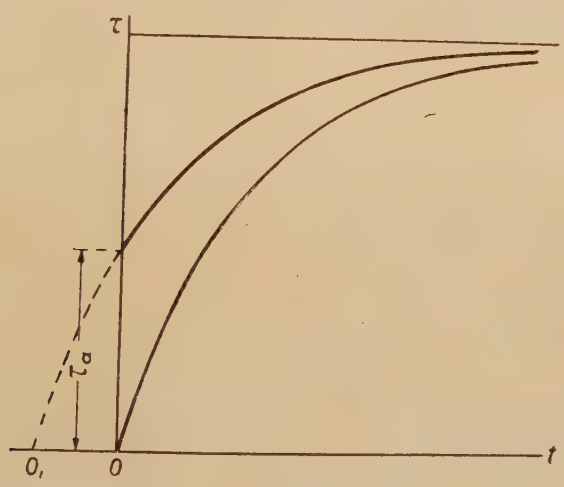
$$t = t' - t_o$$

и

$$\tau_a = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

то получается уравнение

$$\tau' = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t'}{T}}\right),$$



Фиг. 90.

совершенно идентичное с первым, только начало отсчета времени перешло в точку O'.

Очевидно, что таким же образом из кривой охлаждения тела, нагретого на τ_m ° C выше температуры среды, можно получить соответствующую кривую охлаждения для тела, нагретого выше температуры среды на τ_a ° C.

Далее, если в выражении

$$\tau = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

положить, что $\tau = \tau_1 + \tau'$, и $t = t_1 + t'$, то уравнение принимает вид:

$$\tau' + \tau_1 = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

$$\tau' = \tau_m - \tau_m \cdot e^{-\frac{t_1 + t'}{T}} - \tau_1,$$

$$\tau' = \tau_m - \tau_m \cdot e^{-\frac{t_1 + t'}{T}} - \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) = \tau_m \cdot e^{-\frac{t_1}{T}} \left(1 - e^{-\frac{t'}{T}}\right),$$

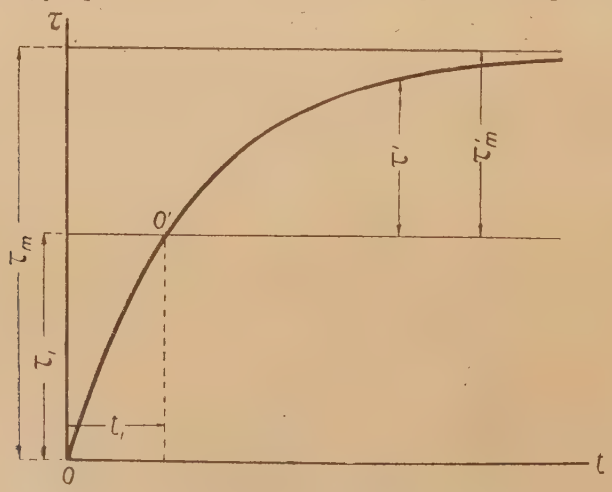
или

$$\tau' = \tau_m' \left(1 - e^{-\frac{t'}{T}}\right),$$

где

$$\tau'_m = \tau_m \cdot e^{-\frac{t_1}{T}}.$$

Таким образом для кривой нагрева с τ_m и $\tau_a = 0$, часть ее, начиная с точки (t_1, τ_1), является опять-таки кривой нагрева с началом



Фиг. 91.

координат в этой точке, каковая на фиг. 91 обозначена посредством O' и с $\tau_m' = \tau_m - \tau_1$.

Подобным же образом, подставив в уравнение охлаждения

$$\tau = \tau_a \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

вместо t выражение $t = t_1 + t'$, получают:

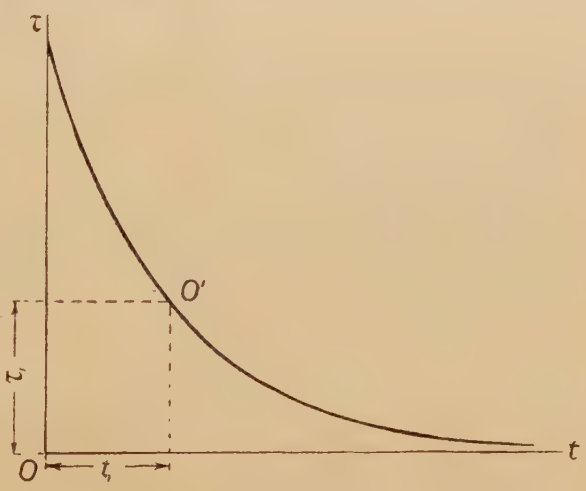
$$\tau = \tau_a \cdot e^{-\frac{t_1 + t'}{T}} = \tau_a e^{-\frac{t_1}{T}} \cdot e^{-\frac{t'}{T}},$$

$$\tau = \tau_a' \cdot e^{-\frac{t'}{T}},$$

где

$$\tau_a' = \tau_a \cdot e^{-\frac{t_1}{T}},$$

т. е. часть кривой охлаждения, начиная с точки (t_1, τ_a'), представляет опять кривую охлаждения, начинающуюся от начального повышения температуры и с началом координат в точке O' (фиг. 92), ординаты которой равны t_1 и τ_a'.



Фиг. 92.

Из вышеприведенных уравнений видно, что протекание процессов нагревания и охлаждения зависит от двух постоянных τ_m и T. Здесь τ_m есть то максимальное повышение температуры тела, которое устанавливается при непрерывном подводе тепла к телу. Достичь этого повышения температуры тело может только по прошествии бесконечно длинного промежутка времени, так как из уравнения нагревания с очевидностью следует, что $\tau = \tau_m$ только при $t = \infty$. Постоянную T согласно предложения Гельмгольца (Helmholtz) и Ольшлегера (Oelschläger) принято называть постоянной времени нагрева, причем она имеет размер-

ность времени. Так как постоянная нагрева G и удельная теплоемкость q несколько изменяются в зависимости от температуры, то T можно рассматривать как постоянную только приближенно в некоторых пределах.

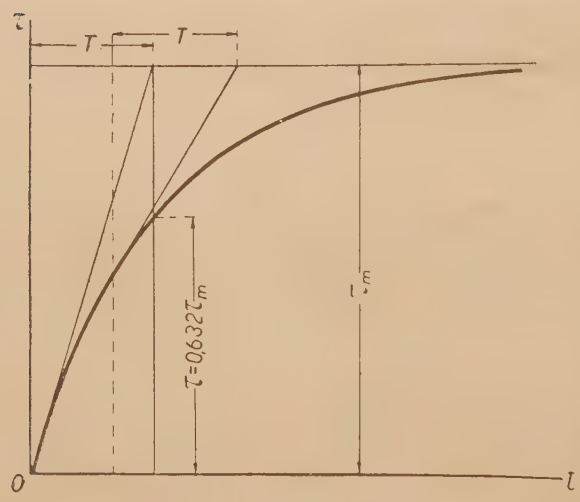
Из уравнения нагрева следует, что для начального момента времени, т. е. при $t=0$

$$\frac{d\tau}{dt}=\frac{\tau_m}{T}=\operatorname{tg}\gamma$$

или, если заменить τ_m и T соответствующими выражениями, приведенными выше, то получается

$$\frac{d\tau}{dt}=\operatorname{tg}\gamma=\frac{P}{G\cdot q}=\frac{\textit{тепло, выделяющееся в теле в 1 sec}}{\textit{теплоемкость всего тела}}.$$

Это выражение дает угол наклона касательной, проведенной к кривой $\tau=f(t)$ в начальной ее точке (фиг. 93), т. е. наклон касательной всецело определяется количеством выделяемого в теле в 1 *sec* тепла и теплоемкостью тела. Из той же фиг. 93 видно, что значение T определяется значением подкасательной, измеренным на асимптоте к кривой, причем для всех точек кривой эти значения одинаковы. Из того же чертежа фиг. 93 вытекает и физический смысл постоянной T, которая означает время, необходимое для того, чтобы повышение температуры достигло значения τ_m, в случае, если не происходит никакого рассеяния тепла.



Фиг. 93.

Так как измерение температуры тела возможно, конечно, только с некоторой точностью, то практически можно считать, что стационарное состояние тела наступает тогда, когда повышение температуры τ становится меньше ошибки наблюдения. Поэтому при испытаниях приборов и аппаратов на нагревание интересно знать, через какой промежуток времени повышение температуры τ будет отличаться от максимального

повышения температуры τ_m на $\varkappa\,^0/_0$. Для этого необходимо поставить условие, чтобы

$$\frac{\tau_m - \tau}{\tau_m} \cdot 100 = \varkappa,$$

откуда

$$\tau = \tau_m \left(1 - \frac{\varkappa}{100}\right);$$

Подставляя полученное выражение в уравнение нагрева, получают

$$\tau_m \left(1 - \frac{\varkappa}{100}\right) = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

$$\frac{\varkappa}{100} = e^{-\frac{t}{T}}$$

$$\frac{t}{T} = ln\,\frac{100}{\varkappa} = 2{,}3\,lg\,\frac{100}{\varkappa}.$$

Задаваясь различными значениями $\varkappa$, легко получить следующую таблицу 18:

Таблица 18

$\varkappa\,^0/_0$	10	5	4	3	2	1	0,5
$\frac{t}{T}$	2.3	3.0	3,22	3,51	3,91	4,6	5,3

Из таблицы следует, что по прошествии времени $t \cong 4T$ повышение температуры тела отличается от максимального значения менее, чем на $2\,^0/_0$, т. е. тепловое состояние тела практически можно считать установившимся.

Приняв $t = T$, получают, что через T секунд от начала нагрева повышение температуры составляет около $63\,^0/_0$, т. е. что через промежуток времени, равный постоянной времени нагрева, $\tau = 0{,}632\,\tau_m$.

c. Постоянная времени нагрева. — Ранее было приведено выражение для постоянной времени нагрева

$$T = \frac{G \cdot q}{S \cdot \alpha} = \frac{G \cdot q \cdot C}{S}.$$

Вместо веса тела G в это уравнение можно ввести объем тела V, но тогда удельную темплоемкость q надо выразить не в $\frac{cal}{g^\circ C}$, а в $\frac{Joule}{cm^3\,^\circ C} = 4{,}189\,q \cdot \gamma = q_1$, и предыдущее уравнение принимает вид:

$$T = \frac{V \cdot q_1 \cdot C}{S} = \frac{s \cdot q_1 \cdot C}{10\,u}, \qquad 23$$

где s — поперечное сечение цилиндрического тела в mm^2, а u — периметр его сечения в mm.

Определив из уравнения $\tau_m = \frac{P \cdot C}{S}$ значения $\frac{C}{S}$ и подставив его в выражение для T, получают

$$T = \frac{V \cdot q_1}{P} \cdot \tau_m.$$

Для проводника длиной l m с поперечным сечением s mm^2 и удельным сопротивлением $\rho \frac{\Omega\, mm^2}{m}$ постоянная времени нагрева равняется

$$T = \frac{\frac{s}{100} \cdot 100 \cdot l \cdot q_1 \cdot \tau_m}{\frac{\rho \cdot l}{s} \cdot I^2} = \frac{q_1 \cdot \tau_m}{\rho \cdot i_s^2}, \qquad 24$$

откуда видно, что для определения постоянной времени нагрева проводника достаточно знать физические постоянные материала проводника q_1 и ρ и максимальное повышение температуры τ_m при определенном i_s.

В случае, если отдельные части тела выполнены из различных материалов, значение T можно определить с помощью уравнений:

$$T = \frac{(v_1 \cdot q_{11} + v_2 \cdot q_{12} + \ldots \ldots) \cdot C}{S} \qquad 25$$

или

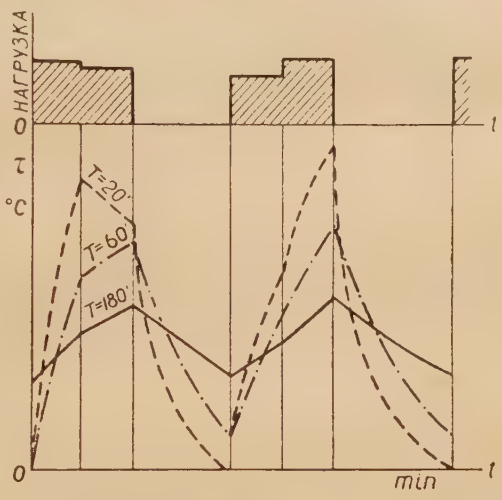
$$T = \frac{(v_1 \cdot q_{11} + v_2 \cdot q_{12} + \ldots) \tau_m}{P}, \qquad 26$$

где v_n и q_{1n} — объемы и физические постоянные для материалов отдельных элементов тела, а P — общая поглощаемая мощность.

Последние уравнения показывают, что постоянную времени нагрева можно увеличить, увеличивая объем материала непроводящего тока, т. е. изоляции. Целесообразность такого увеличения, само собой понятно, ограничивается теплоотдачей и теплопроводностью данного изолирующего материала. Чем больше значения этих величин, тем большего увеличения можно достичь. Однако при расчетах с такой искусственно увеличенной постоянной времени нагрева надо быть очень осторожным, как это будет видно из дальнейшего.

Если нагрузка токопроводящей части настолько мала, что повышение температуры происходит очень медленно, то в распределении тепла может участвовать вся масса изоляции, и в этом случае при больших объемах изоляции максимальное повышение температуры достигается через большой промежуток времени. Совершенно иначе

обстоит дело, если проводник сильно нагружен; тогда температура его повышается настолько быстро, что может наступить перегрев слоев изоляции, прилегающих непосредственно к проводнику, прежде чем на внешней поверхности изолирующего тела будет обнаружено хоть малейшее повышение температуры. Это обстоятельство должно учитываться в первую очередь при определении коэффициента перегрузки при кратковременной или прерывистой работе, так как при больших значениях коэффициента перегрузки постоянная времени нагрева в действительности для слоев, прилегающих к проводнику, значительно меньше, что требует понижения значения коэффициента перегрузки. Уменьшения постоянной времени нагрева можно достичь изменением условий охлаждения, а именно, чем меньше C или τ_m, тем интенсивнее должно быть охлаждение, как это видно из уравнений для постоянной времени нагрева.



Фиг. 94.

Влияние значения постоянной времени нагрева на процесс изменения температуры легко видеть из кривых, изображенных на фиг. 94.

Значения постоянной нагрева C зависят от рода наружных поверхностей тела, а также от их температуры. Для любой температуры в пределах от 30° C до 250° C существует соотношение:

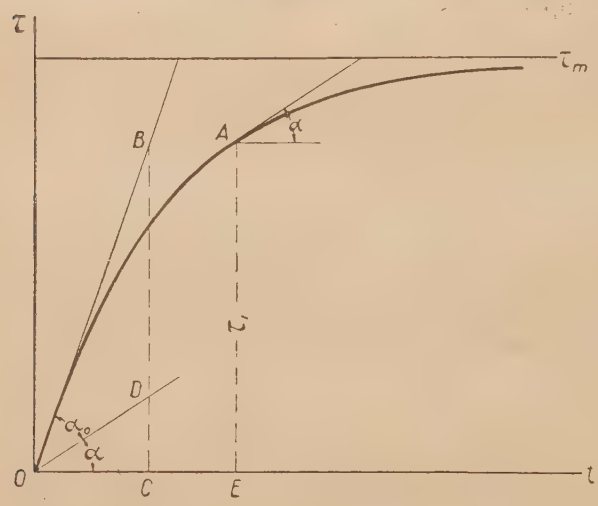
$$C_1 = C_2 \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}},$$

где C_1 и C_2 — постоянные нагрева при температурах тела ϑ_1 и ϑ_2.

§ 27. Косвенные методы определения τ_m. Определение значений максимального повышения температуры τ_m. — Ранее уже упоминалось, что для получения опытным путем максимального повышения температуры нагрев прибора должен производиться в течение весьма длительного промежутка времени, что всегда бывает сопряжено с большими затруднениями, а иногда и совершенно оказывается невозможным. Однако значение максимального повышения температуры может быть найдено на основании результатов только

частично произведенного опыта нагревания прибора. Действительно практические кривые нагрева весьма близки к экспоненциальным кривым, используя свойства которых можно определить максимальное повышение температуры, т. е. их асимптоту.

Большинство методов определения можно подразделить на две категории: одни пользуются углами наклона касательных к кривой в определенных точках, как то: Сильванус Томсон (Sylvanus Thompson), Лоппе (Loppé), Тоннелье (Tonnelier) и др.; другие пользуются результатами измерения температуры тела в определенные моменты времени, а именно Лис (Lees), Тоннелье, Бюро (Bureau), причем методы, относящиеся ко второй категории, дают более точные результаты, так как вычерчивание касательных к кривой может быть выполнено с значительно меньшей точностью, чем построение ординат отдельных точек кривой.



Фиг. 95.

a. Метод Лоппе и С. Томсона. — Этот метод заключается в том, что опытным путем снимается часть кривой нагрева и к ней проводятся две касательные в начале координат и в точке, соответствующей некоторому моменту времени t_1, выбираемому с таким расчетом, чтобы углы наклона обеих касательных к оси абсцисс были по возможности различны (фиг. 95).

Для любого момента времени справедливо равенство

$$\frac{d\tau}{dt} = \tau_m \cdot \frac{1}{T} e^{-\frac{t}{T}} = \frac{1}{T}(\tau_m - \tau) \qquad 27$$

Для $t = 0$, так как тогда и $\tau = 0$,

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T} \cdot \tau_m = \operatorname{tg} \alpha_0.$$

Для $t = t_1$, обозначив соответствующее повышение температуры через τ_1, получают

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T}(\tau_m - \tau_1) = \operatorname{tg} \alpha.$$

Разделив почленно два последние уравнения друг на друга, находят

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_0}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau_1}.$$

Откуда окончательно определяют

$$\tau_m = \tau_1 \cdot \frac{\operatorname{tg}\alpha_0}{\operatorname{tg}\alpha_0 - \operatorname{tg}\alpha}. \qquad 28$$

Практически достаточно через начало координат провести параллель касательной к кривой в некоторой точке A до пересечения в точке D с какой-либо ординатой касательной к кривой в начале координат, тогда

$$\tau_{m1} = \tau_1 \cdot \frac{\overline{BC}}{\overline{BC} - \overline{DC}} = \tau_1 \cdot \frac{\overline{BC}}{\overline{BD}},$$

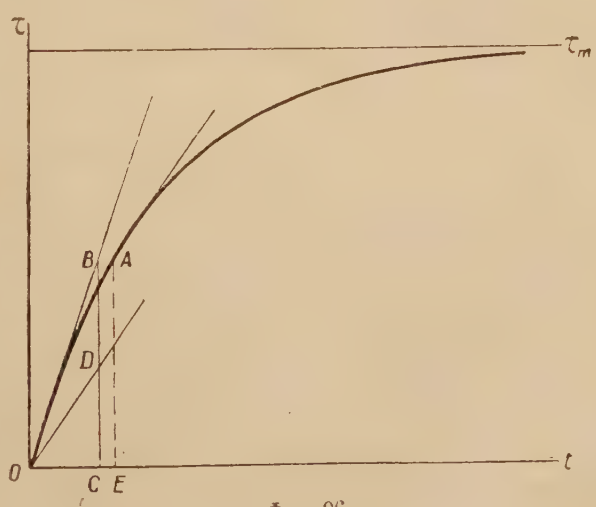
так как отрезки $\overline{BC}$ и $\overline{BD}$ соответственно пропорциональны тангенсам углов α_0 и α.

В методе С. Томсона отмечается, что в конце концов

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{T}(\tau_m - \tau_1)$$

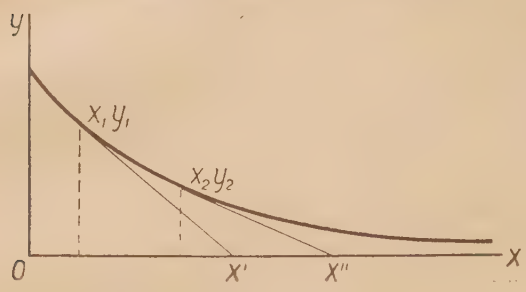
пропорционален разности между конечным повышением температуры и повышением температуры τ_1, в момент времени t_1. В частности, если τ_1 равно $\frac{\tau_m}{2}$ (фиг. 96) или $\frac{2}{3}\tau_m$, отношение $\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{tg}\alpha_0}$ имеет то же значение, что и $1 - \frac{\tau_1}{T}$, т. е. $^1/_2$ или $^1/_3$.

Поэтому проводят касательную к кривой нагрева в начале координат и какую-нибудь ординату $\overline{BC}$. Соединяют начало координат с серединой D отрезка $\overline{BC}$ и проводят касательную к кривой параллельно линии $\overline{OD}$. Ордината $\overline{AE}$ точки касания представляет половину максимального повышения температуры.



Фиг. 96.

Точно так же, если точку D взять на одной трети ординаты BC, считая от оси абсцисс, то ордината точки касания касательной, параллельной OD, составляет две трети от τ_m.



Фиг. 97.

b. Метод Тоннель — Этот метод основан на следующем принципе: если в двух точках экспоненциальной кривой A и B с координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 провести касательные к этой кривой, то при условии, что асимптотой кривой является ось x-ов, отрезок оси x-ов, отсеченный вышеупомянутыми касательными, равен разности абсцисс точек A и B, т. е. $x_2 - x_1$.

Доказательство этого не представляет никаких затруднений. Действительно пусть имеется экспоненциальная кривая, например, $y = A \cdot e^{-kx}$ (фиг. 97), тогда

$$\frac{dy}{dx} = -A \cdot e^{-kx} = -y,$$

и уравнения двух касательных, проведенных в точках (x_1, y_1) и (x_2, y_2), представляются так:

$$y - y_1 = -Ay_1(x - x_1),$$
$$y - y_2 = -Ay_2(x - x_2).$$

Для $y = 0$ соответствующие значения абсцисс определяются уравнением

$$x' - x_1 = x'' - x_2 = -\frac{1}{A},$$

откуда

$$x'' = x' = x_2 - x_1.$$

Применив этот вывод к кривой нагрева, асимптота которой имеет ординату τ_m, получают (фиг. 98)

$$\overline{A_1B_1} = \overline{A_2B_2}.$$

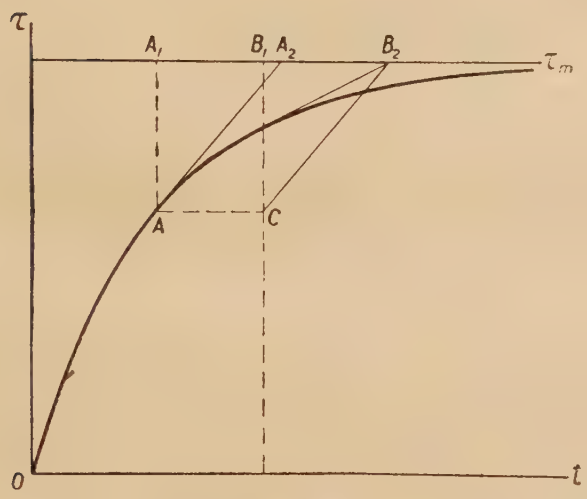
Если теперь через точку C, расположенную на пересечении горизонтали, проведенной через точку A, и ординаты точки B провести параллель к касательной в точке A до пересечения с касательной точке B, то получают точку B_2, ордината которой и представляет искомое повышение температуры τ_m.

Графическое построение в данном случае можно заменить аналитическим подсчетом значения τ_m. Действительно, если обозначить через τ_1 и τ_2 ординаты точек кривой A и B и через α_1 и α_2 углы наклона касательных в этих точках к оси абсцисс, то получаются два уравнения:

$$\left(\frac{d\tau}{dt}\right)_{\tau=\tau_1} = \frac{1}{T}(\tau_m - \tau_1) = \operatorname{tg}\alpha_1$$

и

$$\left(\frac{d\tau}{dt}\right)_{\tau=\tau_2} = \frac{1}{T}(\tau_m - \tau_2) = \operatorname{tg}\alpha_2,$$



Фиг. 98.

выделяя из которых величину T, получают

$$\frac{\operatorname{tg}\alpha_1}{\operatorname{tg}\alpha_2} = \frac{\tau_m - \tau_1}{\tau_m - \tau_2}, \qquad 29$$

или окончательно

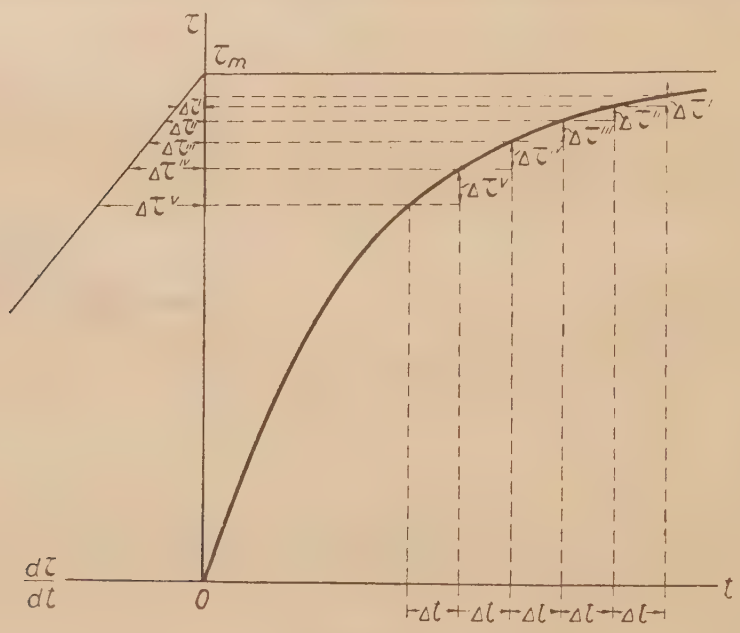
$$\tau_m = \frac{\tau_2 \cdot \operatorname{tg}\alpha_1 - \tau_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha_2}{\operatorname{tg}\alpha_1 - \operatorname{tg}\alpha_2}.$$

Эта формула является простым обобщением формулы Лоппе, в которой предполагается, что точка A совпадает с началом координат.

c. Метод Союза германских электротехников. — Из уравнения $\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T}(\tau_m - \tau)$ следует, что

$$\tau = \tau_m - T \cdot \frac{d\tau}{dt}, \qquad 30$$

т. е. что повышение температуры τ, нанесенное в функции от $\frac{d\tau}{dt}$, должно представлять собой прямую линию, отсекающую на оси абсцисс отрезок $\frac{\tau_m}{T}$, на оси ординат — отрезок τ_m. Таким образом для определения значения τ_m достаточно построить прямую, изображающую зависимость $\tau = f\left(\frac{d\tau}{dt}\right)$. Проще всего это сделать следующим образом: пусть опытным путем снят некоторый участок кривой нагрева



Фиг. 99.

(фиг. 99), лежащий на верхней пологой части кривой. Проводят ряд ординат, отстоящих друг от друга на равные небольшие промежутки, обозначенные через Δt, и принимают соответственные приросты температуры равными $\Delta\tau'$, $\Delta\tau''$, $\Delta\tau'''$ и т. д. Тогда получается ряд соотношений

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\Delta\tau'}{\Delta t},$$

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\Delta\tau''}{\Delta t},$$

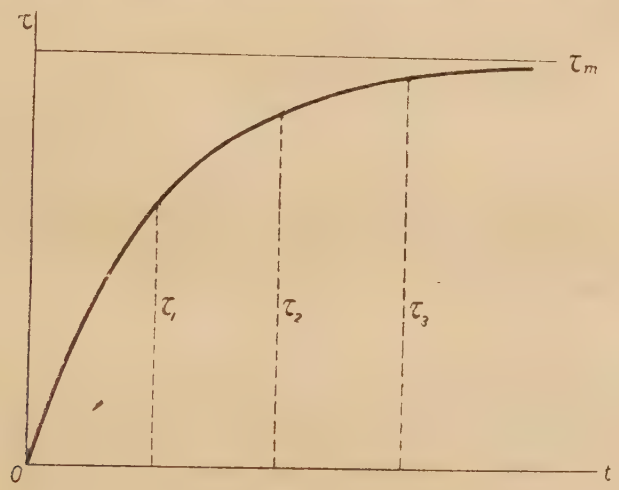
$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\Delta\tau'''}{\Delta t} \text{ и т. д.}$$

Так как знаменатели в правой части всех уравнений равны между собою, то для построения участка прямой $\tau = f\left(\frac{d\tau}{dt}\right)$ достаточно на

левой половине фиг. 99 откладывать непосредственно отрезки $\Delta\tau'$, $\Delta\tau''$, $\Delta\tau'''$ и т. д.

Соединяя концы этих отрезков прямой и продолжая ее до пересечения с осью ординат, находят, таким образом, значение τ_m. Отрезки $\Delta\tau'$, $\Delta\tau''$ и т. д. следует откладывать в таком масштабе, чтобы полученная прямая пересекала ось ординат не под очень острым углом.

d. Метод Лиса и Тоннельe. — Для определения значений τ_m по этому методу надо знать только значения ординат трех точек кри-



Фиг. 100.

вой нагрева и, таким образом, можно избежать вычерчивания касательных.

Пусть τ_1, τ_2 и τ_3 суть повышения температуры, измеренные по кривой нагрева через равные промежутки времени, т. е. в моменты времени соответственно равные t, $t+t_1$ и $t+2t_1$ (фиг. 100). На основании обычного уравнения нагрева можно написать следующие уравнения:

$$\tau_1 = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

$$\tau_2 = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t+t_1}{T}}\right)$$

$$\tau_3 = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t+2t_1}{T}}\right).$$

Преобразуя эти уравнения следующим образом:

$$\tau_m - \tau_1 = \tau_m \cdot e^{-\frac{t}{T}},$$

$$\tau_m - \tau_2 = \tau_m \cdot e^{-\frac{t+t_1}{T}},$$

$$\tau_m - \tau_3 = \tau_m \cdot e^{-\frac{t+2t_1}{T}},$$

и деля их почленно друг на друга, получают:

$$\frac{\tau_m - \tau_1}{\tau_m - \tau_2} = \frac{\tau_m - \tau_2}{\tau_m - \tau_3} = e^{\frac{t_1}{T}},$$

или

$$(\tau_m - \tau_2)^2 = (\tau_m - \tau_1)(\tau_m - \tau_3),$$

откуда окончательно

$$\tau_m = \frac{\tau_2^2 - \tau_1 \cdot \tau_3}{2\tau_2 - (\tau_1 + \tau_3)}. \qquad 31$$

Эта формула дает тем более точные результаты, чем больше разнятся между собою значения τ_1, τ_2 и τ_3, т. е. чем дольше производится опыт. Вполне достаточно производить опыт в течение половины или трети того времени, которое необходимо для достижения установившегося состояния машины. Температуру измеряют через определенные промежутки времени и для каждой группы из трех подходящих отсчетов определяют значения τ_m, и за истинное значение принимают среднее из всех полученных.

Тоннелье несколько видоизменил эту формулу, введя в нее разности повышений температур

$$D_{21} = \tau_2 - \tau_1 \text{ и } D_{32} = \tau_3 - \tau_2,$$

благодаря чему формула приняла вид

$$\tau_m = \frac{\tau_3 \cdot D_{21} - \tau_2 \cdot D_{32}}{D_{21} - D_{32}}.$$

Замечая, что выражение

$$\frac{\tau_m - \tau_1}{\tau_m - \tau_2} = \frac{\tau_m - \tau_2}{\tau_m - \tau_3}$$

можно написать в виде

$$\frac{1}{\tau_m - \tau_2} = \frac{1}{\tau_3 - \tau_2} - \frac{1}{\tau_2 - \tau_1},$$

получают:

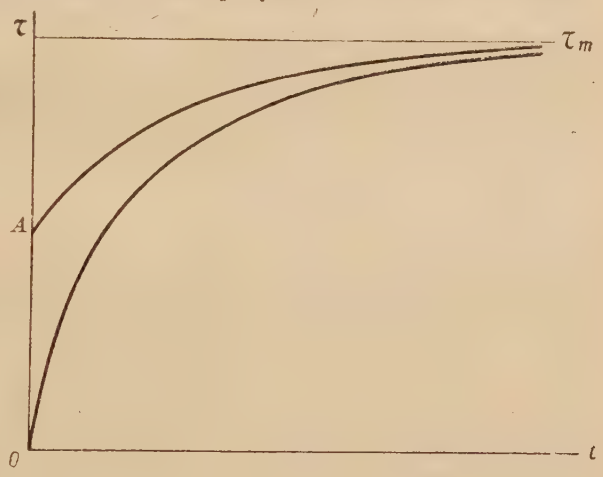
$$\tau_m = \tau_2 + \frac{D_{31} \cdot D_{21}}{D_{21} - D_{32}}$$

c. Метод Бюро. — Формула Бюро для определения значения τ_m представляет из себя не что иное, как предыдущую формулу при условии $\tau_1 = 0$. В этом случае получается более простое выражение

$$\tau_m = \frac{\tau_2^2}{2\tau_2 - \tau_3},$$

которое, конечно, более удобно для применения.

Впоследствии Бюро воспользовался этой формулой в предложенном им новом методе, дающем более точные результаты. Метод этот состоит в том, что сначала строят кривую значений τ_m' для каждой пары значений τ_2 и τ_3, принимая за абсциссы моменты времени, соответствующие значениям или τ_2 или τ_3. Если бы охлаждение следовало точно экспоненциальному закону, то полученная зависимость представляла бы из себя прямую, параллельную оси времени. В общем же при этом получается кривая, форма которой аналогична первой (фиг. 101), но значительно более пологая, причем она может лежать выше или ниже своей асимптоты. После этого начало координат переносят в точку A, иначе сказать, вычитают из значений τ_m', полученных из первой кривой постоянную величину $\overline{OA}$, и к полученной кривой применяют опять ту же формулу. Обычно этого второго приближения бывает вполне достаточно и окончательное значение максимального повышения температуры находят, прибавляя к почти постоянным значениям τ_m'', полученным во второй раз, значение $\overline{OA}$.



Фиг. 101.

С таким же успехом при этом методе можно пользоваться также формулами Лиса и Тоннелье.

Общие замечания. В действительности нагревание прибора не вполне точно следует принятому в основу уравнению. Количество

подводимого тепла в зависимости от времени непостоянно даже при неизменной нагрузке, так как вследствие нагревания элементов сопротивлений в реостатах, потери в них повышаются, и, кроме того, увеличивается теплоотдача посредством конвекции вследствие повышения температуры приборов. Действие этих двух явлений взаимно противоположно, сообразно чему отклонения нагрева прибора от экспоненциального закона очень невелики.

Большие отклонения могут получиться в том случае, если тело состоит из разнородных частей с различными теплоемкостями и постоянными времени. В этом случае вследствие влияния частей с малыми постоянными времени нагрева, кривая нагрева вначале может значительно отклоняться от экспоненциального закона.

Пример. — Для определения значений максимального повышения температуры τ_m сопротивления из никкелиновой проволоки диаметром 2,3 mm с удельным сопротивлением $\rho = 0{,}4\ \frac{\Omega\, mm^2}{m}$ и с температурным коэффициентом $\alpha \cong 0$ при различных нагрузках, были произведены четыре опыта, во время которых по сопротивлению пропускался электрический ток силою в 17,5, 20, 22,5 и 25 A и в определенные моменты времени производились отсчеты повышения температуры. Полученные при этом данные приведены в таблице 19.

Таблица 19.

$I = 17{,}5A$		$I = 20A$		$I = 22{,}5A$		$I = 25A$	
t min	τ °C	t min	τ °C	t min	τ °C	t min	τ °C
0	25	0	25	0	25	0	25
10	108	5	96	5	100	5	108
20	140	8	116	12	168	10	160
25	146	10	128	16	188	12	180
30	148	19	163	23	224	15	204
32	156	32	200	30	247	17	220
40	160	40	218	35	264	20	240
60	175	49	232	44	284	24	266
80	188	60	244	54	292	25	270
100	198	64	214	60	300	31	298
120	201	70	250	65	296	40	323
140	205	—		75	304	50	340
—	—	—	-		—	75	363

По полученным данным были построены для каждого из четырех случаев кривые нагрева и по ним для моментов времени t_2 и $t_3 = 2\,t_2$ взяты соответствующие значе-

ния τ_2 и τ_3, после чего, пользуясь формулой Бюро, были подсчитаны значения τ_m для каждой погрузки.

Полученные значения τ_2 и τ_3 и результаты вычислений приведены в таблице 20.

Таблица 20.

I A	t_2 *min.*	τ_2 °C	τ_3 °C	τ_2^2	$2\tau_2$	$2\tau_2 - \tau_3$	$\tau_m = \frac{\tau_2^2}{2\tau_2 - \tau_3}$
17,5	30	150	176	22 500	300	124	181,6
20,0	30	196	243	38 416	392	149	258,0
22,5	30	250	297	62 500	500	203	308,0
25,0	30	293	350	85 849	586	236	364,5

§ 28. Определение коэффициента перегрузки. *a.* Кратковременная нагрузка. Если какой-либо электрический прибор или аппарат включаются в цепь тока на относительно короткий промежуток времени, то повышение температуры его при этом не достигает допустимого предельного значения, поэтому его можно за этот промежуток времени нагрузить сильнее, учитывая значение допустимого повышения температуры; другими словами, перегрузка может быть допущена такая, при которой прибор за время работы t достигнет как-раз значения допустимого повышения температуры τ_n. Отсюда воспользовавшись уравнением

$$\tau = \tau_n = \tau_m \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

(где τ_m — максимальное повышение температуры, которое может быть достигнуто при перегрузке теоретически через бесконечно длинный промежуток времени), нетрудно определить значение т. н. коэффициента перегрузки

$$p = \frac{\tau_m}{\tau_n} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}}. \qquad 35$$

Коэффициент перегрузки по отношению к потребляемой прибором мощности представляет таким образом отношение максимального повышения температуры, которое получилось бы при той же, но длительной нагрузке, к тому повышению температуры, которое достигается при действии этой же нагрузки в течение времени t и которое обычно должно быть равно нормальному допустимому повышению температуры.

По отношению к силе тока нагрузки уравнение для определения коэффициента перегрузки принимает вид:

$$p' = \sqrt{p} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}}}. \qquad 36$$

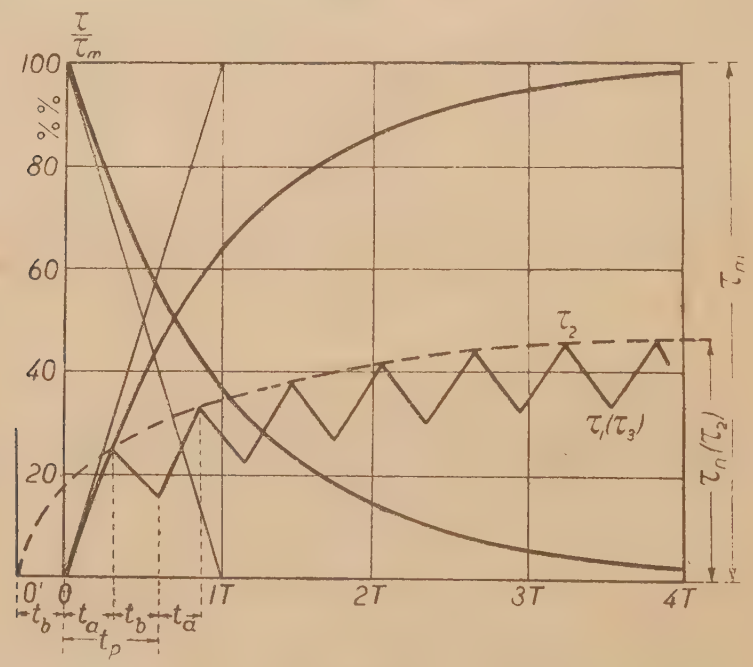
При $\frac{t}{T} \cong 0$, т. е. когда период нагрузки по сравнению с постоянной времени нагрева мал, то

$$p = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}} \cong \frac{T}{t}, \qquad 35'$$

а

$$p' \cong \sqrt{\frac{T}{t}}. \qquad 36'$$

b. Прерывистая нагрузка. Иначе происходит процесс нагревания при прерывистой нагрузке, при которой в отличие от



Фиг. 102.

кратковременной нагрузки, периоды охлаждения реостата, следующие за периодами нагревания, не настолько продолжительны, чтобы повышение температуры успевало за это время снизиться до нуля. При периодически повторяющейся нагрузке получается ряд следующих друг за

другом кривых нагревания и охлаждения (фиг. 102). Установившийся тепловой режим и, следовательно, максимальное повышение температуры в этом случае получаются тогда, когда повышение температуры за период нагревания делается равным понижению температуры за период охлаждения. Соединяя вершины такой зигзагообразной кривой повышения температуры получают логарифмическую кривую.

Если ординаты ее асимптоты и ординаты значения допустимого повышения температуры $\tau_n = \tau_2$ совпадают, то отношение максимального повышения температуры, которое могло бы быть достигнуто, если бы не было периодов охлаждения, к τ_n и определяет собой коэффициент перегрузки p, как это будет видно из дальнейшего.

Пусть t_a есть период нагрузки, а t_b — период охлаждения, тогда время одного полного периода $t_p = t_a + t_b$. Пусть означают τ_2 — высший, а τ_1 или τ_3 — нисшие пределы повышения температуры при установившемся тепловом состоянии.

Для удобства рассуждения определяют сначала в общем виде повышение температуры за промежуток времени между моментами времени t_1 и t_2, причем $t_2 - t_1 = t_a$.

На основании выведенной ранее формулы 20 можно написать:

$$t_2 = T \ln \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau_2},$$

$$t_1 = T \ln \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau_1},$$

$$t_a = t_2 - t_1 = T\left(\ln \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau_2} - \ln \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau_1}\right) = T \ln \frac{\tau_m - \tau_1}{\tau_m - \tau_2}.$$

Аналогичным образом для периода охлаждения (см. форм. 22) получается:

$$t_2 = T \ln \frac{\tau_m}{\tau_2}, \qquad t_3 = T \ln \frac{\tau_m}{\tau_3}.$$

При установившемся тепловом состоянии падение температуры за период охлаждения должно быть равно повышению ее за предыдущий период нагрева, т.-е. $\tau_2 - \tau_1 = \tau_2 - \tau_3$, тогда

$$t_3 - t_2 = t_b = T\left(\ln \frac{\tau_m}{\tau_1} - \ln \frac{\tau_m}{\tau_2}\right) = T \ln \frac{\tau_2}{\tau_1}.$$

Из последнего уравнения следует:

$$\tau_1 = \tau_2 \cdot e^{-\frac{t_b}{T}}.$$

Подставляя полученное для τ_1 значение в уравнении для t_a, получают:

$$\frac{t_a}{T} = \ln \frac{\tau_m - \tau_2 \cdot e^{-\frac{t_b}{T}}}{\tau_m - \tau_2}.$$

После ряда преобразований окончательно находят:

$$\frac{\tau_m}{\tau_2} = \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{T}} \cdot e^{-\frac{t_b}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_a + t_b}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}. \qquad 37$$

Теперь коэффициент перегрузки равен $p = \frac{\tau_m}{\tau_2}$; так как τ_2 должно соответствовать допустимой температуре τ_n, то

$$p = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}, \qquad 38$$

т. е коэффициент перегрузки равен отношению повышения температуры, которое получилось бы при продолжительной постоянной нагрузке к действительному повышению температуры, имеющему место при рассматриваемой прерывистой нагрузке.

К этим же результатам приводит также и рассмотрение фиг. 102. Если сдвинуть всю кривую нагрева с ее максимумом τ_2 вправо на отрезок абсциссы, выражающий время t_2, так, чтобы она начиналась в начале координат, то сразу становится видным, что отношение ординат обеих кривых, соответствующих одинаковым значениям абсцисс, все время остается постоянным. При этом не надо только забывать, что оно остается постоянным с самого начала кривой, так как изменяется только τ_m, но не характер кривой; постоянная времени нагрева T одинакова для обеих кривых. Отсюда следует, что для определения коэффициента перегрузки достаточно наблюдать только один полный период.

Если период t_p мал по сравнению с постоянной времени нагрева T, то выражение для p можно представить в более упрощенном виде.

Как известно,

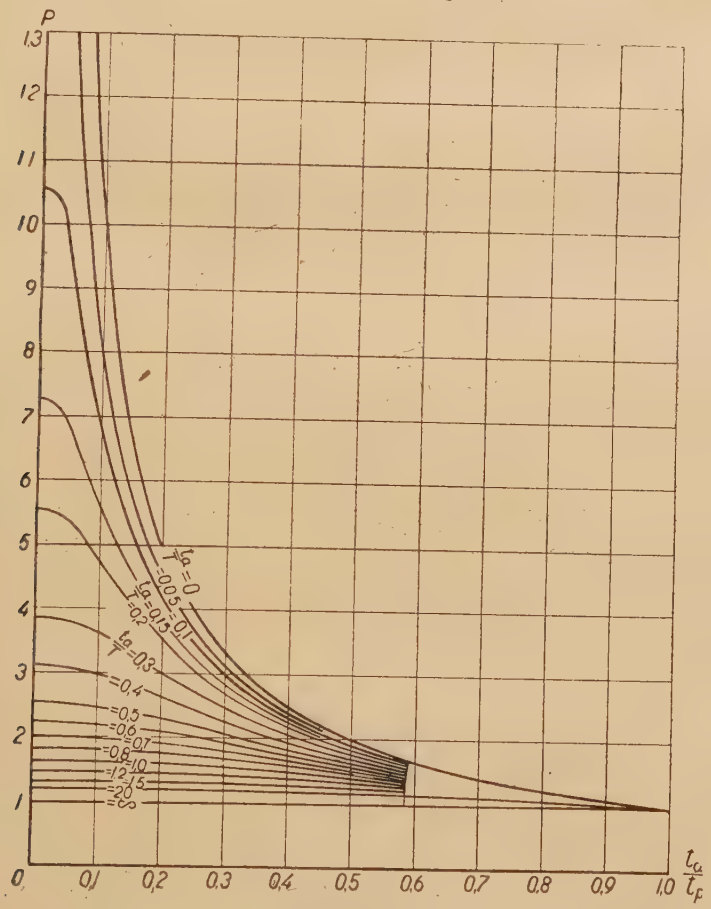
$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} + \frac{x^4}{24} - \cdots,$$

поэтому при $x \cong 0$ с достаточной точностью получается $e^{-x} = \cong 1 - x$.

Таким образом для $\frac{t_p}{T} \cong 0$ следует

$$p = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} \cong \frac{t_a + t_b}{t_a}. \qquad 39$$

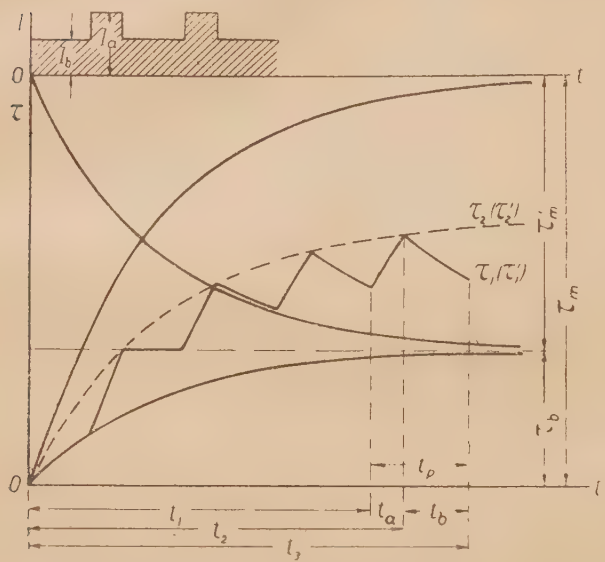
На фиг. 103 приведены кривые, представляющие графически зависимость коэффициента p от отношения $\frac{t_a}{t_p} = \frac{t_a}{t_a + t_b}$.



Фиг. 103.

c. Перемежающаяся нагрузка. На практике часто встречается случай перемежающейся нагрузки, когда во время периода охлаждения нагрузка не исчезает совершенно, а только уменьшается до некоторого предела, поэтому при продолжительном охлаждении

конечное повышение температуры не спускается до нуля, а лишь понижается до некоторого значения τ_b (фиг. 104).



Фиг. 104.

Максимальное повышение температуры в этом случае опять-таки получается тогда, когда повышение температуры за время $t_a = t_2 - t_1$ делается равным понижению таковой за время $t_b = t_3 - t_2$.

Для периода нагревания получают:

$$t_a = T \ln \frac{\tau_m - \tau_1}{\tau_m - \tau_2},$$

а для периода охлаждения —

$$t_b = T \ln \frac{\tau_2'}{\tau_1'}, \quad \text{или} \quad \tau_1' = \tau_2' \cdot e^{-\frac{t_b}{T}}.$$

Здесь значения повышения температуры τ' измерены от оси, параллельной оси абцисс и отстоящей от нее на расстояние τ_b. Чтобы нагревание и охлаждение тела были равны между собою, должно быть опять $\tau_1' + \tau_b = \tau_1$, откуда

$$\tau_1 = \tau_2' \cdot e^{-\frac{t_b}{T}} + \tau_b.$$

Подставляя полученное значение в уравнение для τ_a и преобразуя его, находят

$$e^{\frac{t_a}{T}} = \frac{\tau_m - (\tau_2' \cdot e^{-\frac{t_b}{T}} + \tau_b)}{\tau_m - \tau_2}.$$

Зная, что $\tau_2 = \tau_2' + \tau_b$, после дальнейших преобразований находят значение коэффициента перегрузки

$$p = \frac{\tau_m}{\tau_2} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} - \frac{\tau_b}{\tau_2}\left(\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} - 1\right). \qquad 40$$

Если для удобства обозначить

$$\frac{1-e^{-\frac{t_p}{T}}}{1-e^{-\frac{t_a}{T}}}=p_o, \qquad 41$$

то окончательно получается:

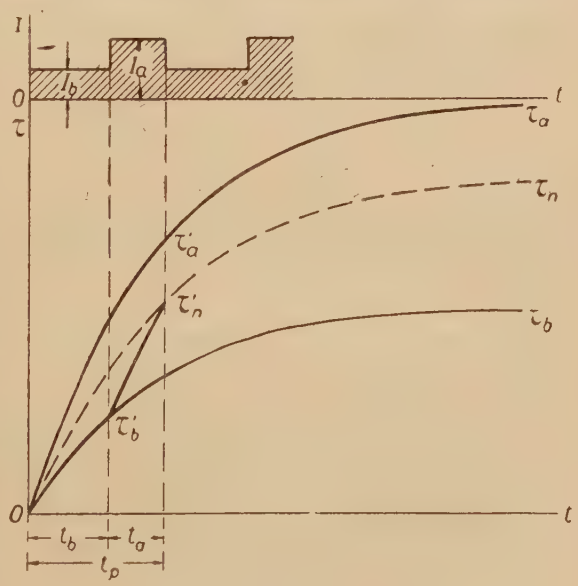
$$p=p_o-\frac{\tau_b}{\tau_2}(p_o-1); \qquad 42$$

$$(\tau_m=p\tau_2=p\cdot\tau_n).$$

τ_2 должно нормально равняться допустимому значению повышения температуры τ_n, а p_o — есть коэффициент перегрузки для того случая, когда $\tau_b=0$. Таким образом член $\frac{\tau_b}{\tau_2}(p_o-1)$ дает то значение, на которое уменьшается коэффициент перегрузки в том случае, если во время периода охлаждения нагрузка не исчезает совершенно. Если $\tau_b=\tau_2$, то $p=1$, т. е. получается случай постоянной нагрузки и при этом должно быть также $\tau_m=\tau_2$.

Значение коэффициента перегрузки может быть выведено еще другим способом на основании уже известного свойства, что для одинаковых значений абсцисс отношение соответствующих ординат двух логарифмических кривых, имеющих одинаковые подкасательные, постоянно.

На фиг. 105 приведена диаграмма нагрузки и, кроме того, принимаются известными максимальные повышения температуры, соответствующие случаям продолжительной нагрузки при силах тока I_a и I_b, каковые соответственно обозначаются через τ_a и τ_b.



Фиг. 105.

Действительное максимальное повышение температуры, которое может быть достигнуто при данной перемежающейся нагрузке, лежит между указанными пределами τ_a и τ_b. Это повышение температуры обозначается посредством

τ_m и должно быть равным значению допустимого повышения температуры τ_n. Коэффициент перегрузки по отношению к повышению температуры, соответствующему наибольшей нагрузке составляет:

$$p = \frac{\tau_a}{\tau_n} = \frac{\tau_a'}{\tau_n'},$$

теперь

$$\tau_a' = \tau_a\left(1 - e^{-\frac{t_a + t_b}{T}}\right).$$

Из общего уравнения нагревания следует:

$$\tau_n' = \tau_a\left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right) + \tau_b\left(1 - e^{-\frac{t_b}{T}}\right) \cdot e^{-\frac{t_a}{T}},$$

а тогда после подстановки

$$p = \frac{\tau_a'}{\tau_n'} = \frac{\tau_a\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}{(\tau_a - \tau_b)\left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right) + \tau_b\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}, \qquad 43$$

и максимальное повышение температуры, которое достигается при данной перемежающейся нагрузке,

$$\tau_n = \frac{\tau_a}{p}.$$

Если бы значение τ_n оказалось слишком велико, то необходимо изменить нагрузки (одну из них или обе).

Оба рассмотренные случая различаются между собою конечным результатом от того, что в первом случае известно $\tau_n + \tau_b$ и с помощью p находят τ_m или τ_a, а во втором случае известны τ_a или τ_m и с помощью p определяют значение τ_n.

Второй способ позволяет легко вычислить коэффициент перегрузки для любого количества перемежающихся нагрузок за время одного полного периода. Для этого следует только определить по общему уравнению нагревания конечное повышение температуры для всего первого периода, которое и представляет собой знаменатель дроби в выражении для p. В числителе всегда находится выражение $1 - e^{-\frac{t_p}{T}}$ умноженное на максимальное превышение температуры, которое может быть достигнуто при продолжительном действии наибольшей из всех нагрузок.

Так например для трех периодически меняющихся нагрузок уравнение для определения коэффициента перегрузки имеет следующий общий вид:

$$p = \frac{\tau_1\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}{\tau_1\left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) + e^{-\frac{t_1}{T}}\left[\tau_2\left(1 - e^{-\frac{t_2}{T}}\right) + \tau_3\left(1 - e^{-\frac{t_3}{T}}\right) \cdot e^{-\frac{t_2}{T}}\right]} \qquad 44$$

Общее уравнение для определения значения коэффициента перегрузки относительно мощности в ваттах представляется таким образом;

$$p = \frac{\tau_1\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}{(\tau_1 - \tau_2)\left(1 - e^{-\frac{t_1}{T}}\right) + (\tau_2 - \tau_3)\left(1 - e^{-\frac{t_1 + t_2}{T}}\right) + \cdots + (\tau_{\nu-1} - \tau_\nu)\left(1 - e^{-\frac{t_1 + t_2 + \cdots + t_{\nu-1}}{T}}\right) + \tau_\nu\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)} \qquad 45$$

Здесь означают:

τ_1 — максимальное повышение температуры, соответствующее продолжительному действию наибольшей нагрузки,

t_1 — промежуток времени действия наибольшей нагрузки,

τ_2 — максимальное повышение температуры, соответствующее продолжительному действию второй по значению нагрузке,

t_2 — промежуток времени действия второй по величине нагрузки,

τ_ν — максимальное повышение температуры, соответствующее продолжительному действию наименьшей нагрузки,

t_ν — промежуток времени действия наименьшей нагрузки,

$t_p = t_1 + t_2 + t_3 + \cdots + t_\nu$ — время одного периода.

Если меньшая нагрузка равна нулю, что соответствует паузе, то в знаменателе пропадают все члены, которые содержат множители τ_ν.

При выводе этой формулы предполагалось, что нагрузки следуют друг за другом в последовательности согласно их величинам. При продолжительной работе оказывается безразличным, с какой нагрузки начать включение, если только не нарушается их последовательность.

На практике не всегда бывает возможность поддерживать вышеупомянутую последовательность в чередовании нагрузок, однако, и в этом случае формула дает достаточно точные результаты, для чего необходимо только соблюдать таковую последовательность при вычислениях. В случае, если хотят считать с большей безопасностью, то выбирают наиболее неблагоприятный в смысле нагрева случай.

Если постоянная времени нагрева для нагревания и охлаждения или для различных промежутков времени неодинакова, то целесообразно все промежутки времени пересчитать на общую постоянную времени нагрева. Неравенство постоянных времени ведет к тому, что кривая

нагрева не может быть выражена одной логарифмической кривой, а состоит из ряда отдельных отрезков. Если имеются две постоянные времени нагрева T_a и T_b, соответствующие промежуткам времени t_a и t_b, то пересчет t_b на общую постоянную T_a производится по формуле

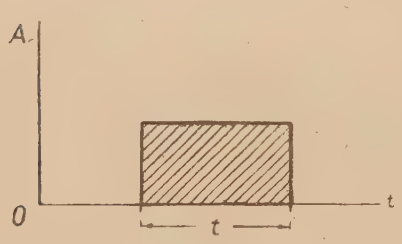
$$t_b' = t_b \cdot \frac{T_a}{T_b}. \qquad 46$$

Период тогда равен

$$t_p' = t_a + t_b' + t_c' + \ldots$$

В заключение следует напомнить, что приведенные выражения для p относятся к значениям мощности; по отношению же силы нагрузочного тока коэффициент перегрузки равен $\sqrt{p}$.

d. Сопоставление коэффициентов перегрузки для различных видов нагрузки. Если обозначить посредством:



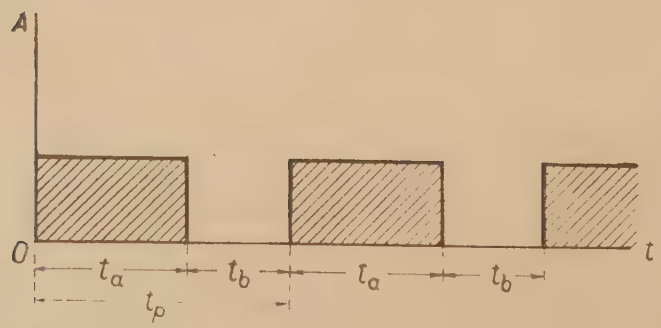
Фиг. 106.

τ_m — максимальное повышение температуры для продолжительной нагрузки или для конца одного периода,

τ_n — допустимое (нормальное) повышение температуры для продолжительной нагрузки или для конца одного периода,

τ_e — действительно достигнутое конечное повышение температуры для продолжительной нагрузки или для конца одного периода, то для кратковременной работы (фиг. 106):

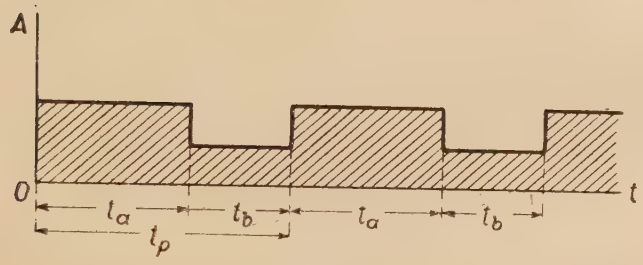
$$p = \frac{\tau_m}{\tau_e} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t}{T}}}, \qquad 47$$



Фиг. 107.

для прерывистой работы (фиг. 107):

$$p = \frac{\tau_m}{\tau_e} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}. \qquad 48$$

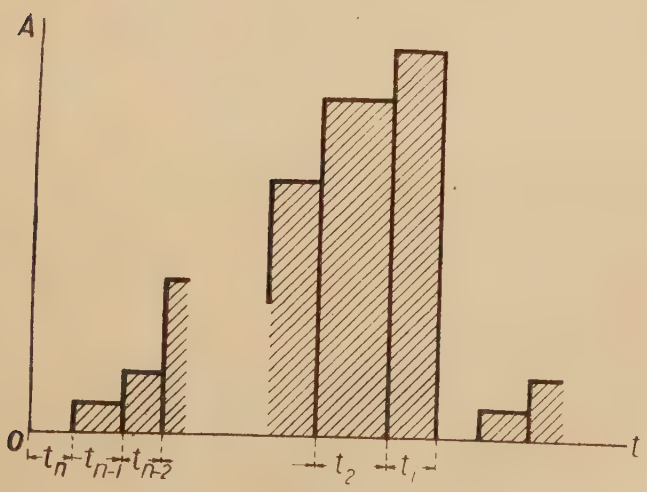


Фиг. 108.

для перемежающейся работы (фиг. 108):

$$p = \frac{\tau_m}{\tau_n} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} - \frac{\tau_b}{\tau_n}\left(\frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} - 1\right) =$$

$$= \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{\left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right) + \frac{\tau_b}{\tau_a}\left[\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right) - \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right)\right]}; \qquad 49$$



Фиг. 109.

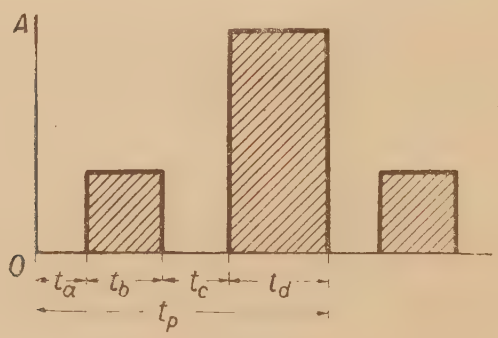
в общем виде (фиг. 109):

$$p=\frac{\tau_m}{\tau_e}=\frac{1}{\left(1-e^{-\frac{t_a}{T}}\right)-\left(1-e^{-\frac{t_a+t_b}{T}}\right)+\left(1-e^{-\frac{2t_a+t_c}{T}}\right)-\left(1-e^{-\frac{2(t_a+t_b)}{T}}\right)+\left(1-e^{-\frac{3t_a+2t_b}{t}}\right)} \quad 50$$

Эта формула дает математически точный результат для наиболее неблагоприятного случая, т. е. если нагрузки следуют друг за другом, постепенно увеличиваясь. Если имеется пауза, то как уже упоминалось, последний член в знаменателе равен нулю.

Для случая с двумя паузами и двумя неравными нагрузками (фиг. 110) коэффициент перегрузки равен:

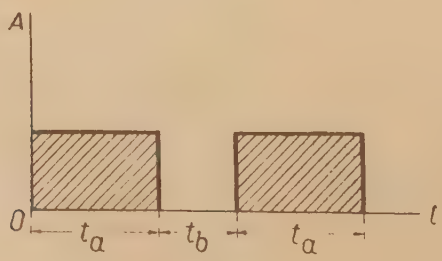
$$p=\frac{\tau_{md}}{\tau_e}=\frac{\tau_{md}\left(1-e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}{\tau_{md}\left(1-e^{-\frac{t_a}{T}}\right)+\tau_{nb}\left[\left(1-e^{-\frac{t_b+t_c+t_d}{T}}\right)-\left(1-e^{-\frac{t_c+t_d}{T}}\right)\right]};\quad 51$$



Фиг. 110.

при двукратном пуске (фиг. 111):

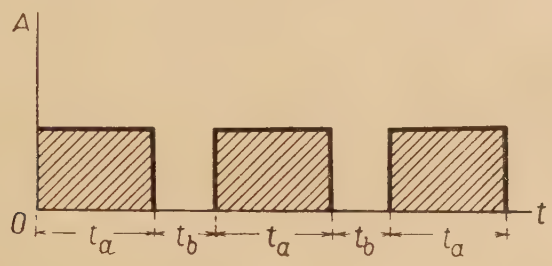
$$p=\frac{\tau_m}{\tau_e}=\frac{1}{\left(1-e^{-\frac{t_a}{T}}\right)-\left(1-e^{-\frac{t_a+t_b}{T}}\right)+\left(1-e^{-\frac{2t_a+t_b}{T}}\right)}; \quad 52$$



Фиг. 111.

при трехкратном пуске (фиг. 112):

$$\tau_e = \frac{\tau_1\left(1-e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}{(\tau_1-\tau_2)\left(1-e^{-\frac{t_1}{T}}\right)+(\tau_2-\tau_3)\left(1-e^{-\frac{t_1+t_2}{T}}\right)+\cdots+(\tau_{\nu-1}-\tau_\nu)\left(1-e^{-\frac{t_1+t_2+\cdots+t_n}{T}}\right)+\tau_\nu\left(1-e^{-\frac{t_p}{T}}\right)} \qquad 53$$



Фиг. 112.

§ 29. Процесс нагревания при непрерывно изменяющейся нагрузке. До сих пор всегда предполагалось, что нагрузка в течение некоторого рассматриваемого промежутка времени остается постоянной, однако это случается не всегда. В общем случае нагрузка является функцией от времени. Пусть, например, сначала наблюдается линейное изменение нагрузки в зависимости от времени, т. е.

$$I = I_o(1 + \beta t).$$

Подводимая энергия без учета изменений удельного сопротивления определяется по уравнению:

$$P = R \cdot I_o^2(1 + \beta t)^2$$

и дифференциальное уравнение теплового баланса аналогично предыдущему получается:

$$R \cdot I_o^2(1 + \beta t)^2 \cdot dt = G \cdot q \cdot d\tau + \tau \cdot S \cdot o \cdot dt, \qquad 54$$

$$\frac{G \cdot q}{S \cdot o} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{R \cdot I_o^2}{S \cdot o}(1 + \beta t)^2;$$

подобно предыдущему вводятся обозначения:

$$\frac{G \cdot q}{S \cdot o} = T$$

$$\text{и} \quad \frac{R \cdot I_o^2}{S \cdot o} = \tau_m$$

для случая продолжительной нагрузки силой тока I_n, и тогда получается

$$T \cdot \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_m (1 + \beta t)^2. \qquad 55$$

Подставляя в полученное уравнение выражение $\tau = u \cdot v$ и следовательно $\frac{d\tau}{dt} = u \frac{dv}{dt} + v \frac{du}{dt}$, находят

$$T \left(u \frac{dv}{dt} + v \frac{du}{dt} \right) + uv = \tau_m (1 + \beta t)^2$$

$$T \frac{du}{dt} + u = 0;$$

$$T \frac{du}{u} = - dt;$$

$$T \ln u = - t;$$

$$u = e^{-\frac{t}{T}};$$

после чего определяют значение v

$$T \left(e^{-\frac{t}{T}} \cdot \frac{dv}{dt} \right) = \tau_m (1 + \beta t)^2$$

$$dv = \frac{\tau_m}{T} \cdot \frac{(1 + \beta t)^2}{e^{-\frac{t}{T}}} \cdot dt = \frac{\tau_m}{T} (1 + \beta t)^2 \cdot e^{-\frac{t}{T}} \cdot dt$$

$$v = \frac{\tau_m}{T} \int (1 + \beta t)^2 \cdot e^{\frac{t}{T}} dt + B. \qquad 55$$

Интегрирование по частям и преобразования дают окончательный результат:

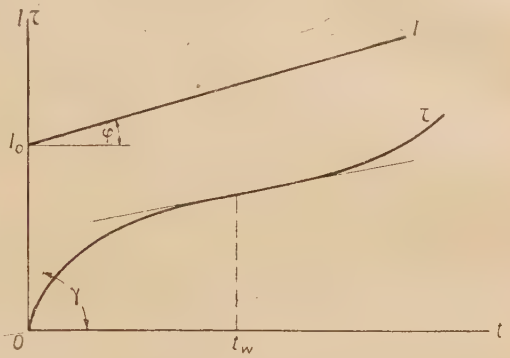
$$\tau = \tau_m \left[(1 - 2\beta T + 2\beta^2 T^2) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + (2\beta t - 2\beta^2 T t + \beta^2 t^2) \right] + \tau_a e^{-\frac{t}{T}} \qquad 56$$

Если начальное повышение температуры τ_a равно нулю, то последний член в полученном уравнении отпадает.

Как видно из последнего уравнения, полученная таким образом кривая нагрева при линейном возрастании силы тока может быть разложена на две составляющих ее кривых, из которых одна представляет собою логарифмическую кривую, а другая изменяется по параболическому закону. Кривая нагрева для данного случая изображена на фиг. 113.

Для определения возрастания температуры вначале находят первую производную и, приравнивая нулю, определяют тангенс угла наклона касательной в начале кривой, т. е.

$$\left(\frac{d\tau}{dt}\right)_{t=o} = \operatorname{tg}\gamma = \frac{\tau_m}{T}(1 - 2\beta T + 2\beta^2 T^2) \quad 57$$

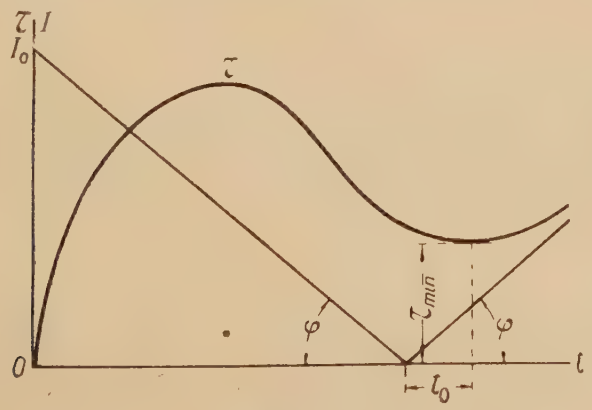


Фиг. 113.

Другой интересной точкой кривой является точка перегиба, вернее сказать, соответствующий ей момент времени, когда повышение температуры в зависимости от времени начинает возрастать и наступает параболический характер кривой. В этом случае для нахождения искомой точки необходимо приравнять вторую производную нулю, и тогда

$$t_w = T \cdot \ln \tau_m \cdot \frac{1 - 2\beta T + 2\beta^2 T^2}{2\beta^2 T^2}.$$

В полученных уравнениях везде $\beta = \frac{1}{I_o} \operatorname{tg} \psi$.



Фиг. 114.

Подобным же образом может быть выведено уравнение нагревания для случая, когда сила тока уменьшается по линейному закону (фиг. 114)

$$I = I_o(1 - \beta t); \qquad P = R \cdot I_o^2 (1 - \beta t)^2;$$

$$\tau = \tau_m \left[(1 + 2\beta T + 2\beta^2 T^2)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - (2\beta t + 2\beta^2 T t - \beta^2 t^2)\right] + \tau_a e^{-\frac{t}{T}}.$$

В момент времени, когда I становится равным нулю, $t = \frac{1}{\beta}$; после этого I начинает опять возрастать. Однако, несмотря на это, τ все еще продолжает уменьшаться и только в момент времени $t = \frac{1}{\beta} + t_n$ достигает своего минимального значения τ_{min}.

Значения промежутка времени t_n зависят от значений угла φ, и они тем меньше, чем меньше изменения силы тока от времени.

Если принять, что теперь линейно возрастает тепловая мощность, а не силы тока, т. е.

$$P = P_o(1 + \beta t) = I_o^2 R(1 + \beta t),$$

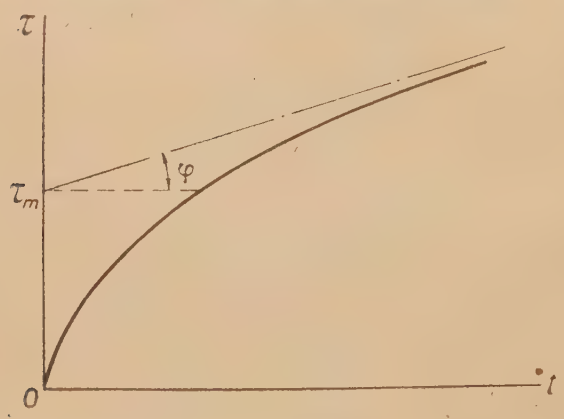
то в этом случае дифференциальное уравнение принимает вид:

$$P_o(1 + \beta t)dt = G \cdot q \cdot d\tau + S \cdot o \cdot \tau dt$$

и уравнение нагрева принимает вид:

$$\tau = \tau_m\left[(1 - \beta T)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \beta t\right] + \tau_a \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \qquad 58$$

В этом случае кривую нагрева можно представить состоящей из двух кривых, из которых одна следует логарифмическому закону, а другая — линейному. Асимптота к данной кривой определяется через $\operatorname{tg} y = \tau_m \cdot \beta$ (фиг. 115).



Фиг. 115

Если происходит линейное уменьшение мощности согласно соотношению

$$P = P_o(1 - \beta t) = I_o^2 R(1 - \beta t), \qquad 59$$

то уравнение нагрева получается

$$\tau = \tau_m\left[(1 + \beta T)\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) - \beta t\right] + \tau_a e^{-\frac{t}{T}}, \qquad 60$$

причем к нему относятся все те же замечания, что и для уравнения нагрева для случая линейно уменьшающейся силы тока.

§ 30. Косвенные методы построения кривых нагрева. — В тех случаях, когда опытное снятие кривых нагрева затруднительно или его

почему-либо желательно избежать, кривые нагревания могут быть построены различными косвенными методами. Такое построение бывает также необходимо как при расчете, так и при исследовании нагревания новых аппаратов. Для построения кривых нагрева косвенным образом существует ряд различных методов, из которых здесь приводятся следующие:

a. Метод Гута (Gut). Этот метод дает возможность на основании уравнений нагревания и охлаждения построить кривую действительного температурного процесса тела при различных следующих друг за другом нагрузках. Для этого заранее должны быть известны: постоянная времени нагрева T и значение максимального повышения температуры τ_m при продолжительном действии каждой из рассматриваемых нагрузок. Обычно, однако, даются не значения τ_m, а диаграмма нагрузки, т. е. зависимость силы тока нагрузки по времени, поэтому предварительно приходится определять соответствующие значения τ_m путем подсчета или опытным путем по результатам отдельных измерений. Если представляется возможность определить значения τ_m для нескольких различных значений нагрузки, то значения τ_m для промежуточных нагрузок могут быть найдены путем интерполяции; если же имеется только одно значение τ_{mn} для силы тока I_n, то для любого значения I_1 соответствующее значение τ_{m1} может быть определено из уравнения

$$\tau_{m1} = \tau_{mn}\left(\frac{I_1}{I_n}\right)^2.$$

Построение диаграммы по методу Гута яснее всего видно из таблицы 21. Значения величин в строках *a*, *b*, *c* и *e* этой таблицы даются, а затем по уравнению или графическим путем (фиг. 116) вычисляется зависимость

$$\tau' = f\left(\frac{t}{T}\right),$$

где

$$\tau' = \frac{\tau}{\tau_m} \cdot 100.$$

Теперь устанавливают значение температуры для 1-го отрезка, например, 0°*C* (I) или 15°*C* (II). Разность значений строк *e* и *f*, умноженная на значение строки *d*, делится на 100, дает повышение или понижение температуры за данный промежуток времени. Таким же образом производится подсчет и для остальных промежутков времени.

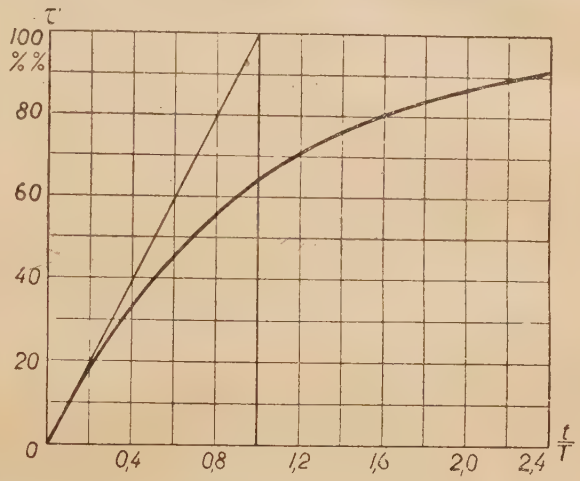
Если значение повышения температуры, принятое для начала первого промежутка времени, не согласуется с действительностью, т. е.

Таблица 21.

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	a	Нагрузка I A	85	0	52	0	101	0	67	90	68	0	68	90	55	0	55
	b	Промеж. времени t *min*	11,5	2,5	13	1	17,5	1	7,5	21 5	7.5	2.5	7	4.5	3.5	1	11
	c	Постоян. врем. нагрева T *min*	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	d	$\tau = f\left(\frac{t}{T}\right)$ %	53	15	58	6	69	6	39	76	39	15	37	26	21	6	52
	e	τ_{max} для продолжительного нагрева . °C	116	0	44	0	164	0	72	130	74	0	76	130	50	0	50
I	*f*	Начальное повышение температ. промеж. = = $f + h$ предыдущего . . . . . °C	0	61.5	52,28	47.48	44,66	127,06	119,44	100,94	78,84	76,96	65,44	69,35	85,13	77,76	73.10
	g	Разность температур = = $e - f$ . . . . . °C	116	—61.5	—8.28	—47,48	119,34	—127.06	—47,44	—29,06	—4.84	—76,96	10.56	60,65	- 35.13	- 77,76	—23,10
	h	Повышение температ. = = $\frac{gd}{100}$ . . . . . °C	61.5	—9,22	- 4,8	-- 2 82	82 4	—7,62	—18.5	—22,10	—1,88	-- 11.52	3,91	15,78	—7,37	—4,66	12,0
II	*f*	Начальное повышение температ. промеж. = = $f + h$ предыдущего . . . . . °C	15	68,5	58,22	49,98	46.98	127,78	120,12	101,32	79,52	77.37	-	—		-	--
	g	Разность температур = = $e - f$ . . . . . °C	101	—68,5	—14,22	—49,98	117,02	—127,78	—48,12	—28,68	—5,52	—	--	---	—	—	—
	h	Повышен. температ. = = $\frac{gd}{100}$ . . . . . °C	53,5	—10,25	—8,24	—3,0	80,8	—7,66	—18,8	—21,8	—2.15	—	-	—	—	—	—

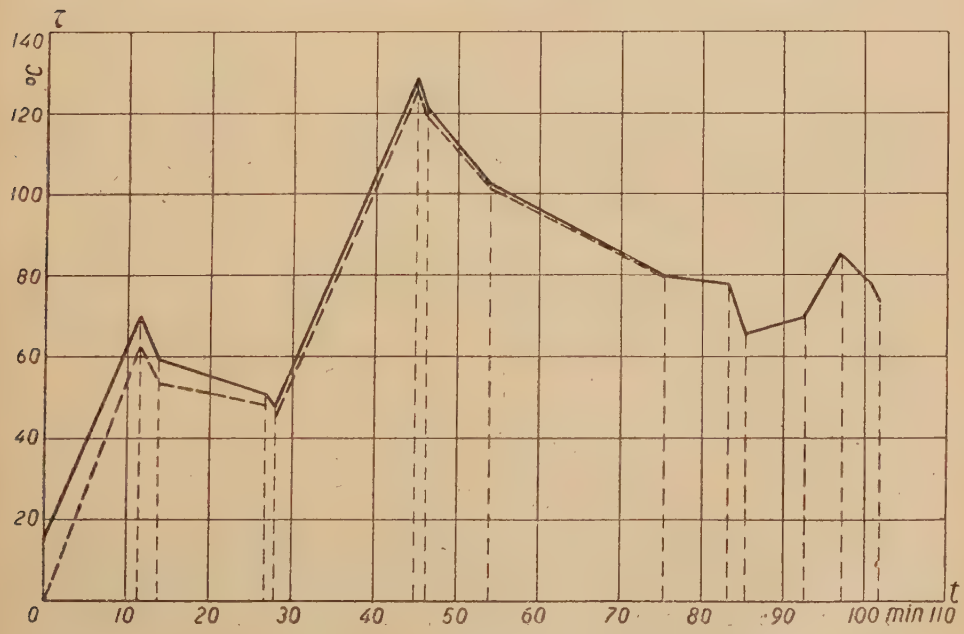
оказывается несколько больше или меньше, то происходящая от этого ошибка по истечении известного промежутка времени, который обычно приблизительно равен $5T$, становится весьма незначительной (меньше 1%).

Построенная таким образом диаграмма нагрева реостата изображена на фиг. 117, где сплошная кривая соответствует начальному повышению температуры в $15^\circ C$, а пунктирная — в $0^\circ C$.



Фиг. 116.

Точность построенной диаграммы легко может быть проверена путем опытного определения значения τ для какого-либо любого значения момента времени и сравнения полученных при этом результатов с расчетными. Если измеренные значения повышения температуры оказываются при нагревании ниже, а при охлаждении выше подсчитанных, то это



Фиг. 117.

указывает, что при подсчетах было принято слишком малое значение постоянной времени нагрева.

b. Графический метод Кнорра (Knorr). С помощью данного метода можно построить графически кривую нагревания тела в зависимости от времени при любой изменяющейся нагрузке. Если через P_z обозначить подводимую энергию в ваттах, а через P_a отводимую охлаждающейся средой, то уравнение теплового баланса принимает вид:

$$G \cdot q \cdot d\tau = (P_z - P_a)\, dt$$

откуда видно, что часть энергии, поглощаемой телом, вызывает повышение температуры его на $\tau^\circ C$.

Отсюда угол наклона α касательной к кривой нагревания (или охлаждения) выражается соотношением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau}{dt} = \frac{P_z - P_a}{G \cdot q},$$

причем теплоемкость $G \cdot q$ в пределах практически допустимых температур можно считать постоянной. Подводимая энергия P_z зависит только от нагрузки и времени и эта зависимость может быть выражена кривой $P_z = f(t)$. Отводимая энергия зависит от повышения температуры τ и вентиляции v и может быть выражена кривыми $P_a = \varphi(\tau)$ для различных значений v.

При исследованиях вопросов нагревания элементов сопротивления в реостатах обычно оперируют со значениями силы нагрузочного тока, а поэтому удобнее заменить в выражении для $\operatorname{tg} \alpha$ значения P_z и P_a через соответствующие им значения силы тока. В общем — $P_z = I^2 \cdot r$ и аналолично можно написать, что $P_a = i^2 r$, где i — некоторая воображаемая сила тока. Зависимость этой силы тока i или удобнее i^2 от повышения температуры τ и условий охлаждения должна определяться из опыта нагревания (см. далее фиг. 119 и объяснение к ней). При дальнейших исследованиях, кладя в основу определенное условие охлаждения, кривую зависимости $i^2 = \varphi(\tau)$ можно считать известной.

Теперь выражение для $\operatorname{tg} \alpha$ принимает вид:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau}{dt} = \frac{I^2 - i^2}{\frac{G \cdot q}{r}}.$$

Интегрирование этого дифференциального уравнения, т. е. определение зависимости между значениями τ и t легко может быть выполнено графическим путем. Последнее соотношение путем введения соответствующих масштабов μ можно превратить в такое, куда входят

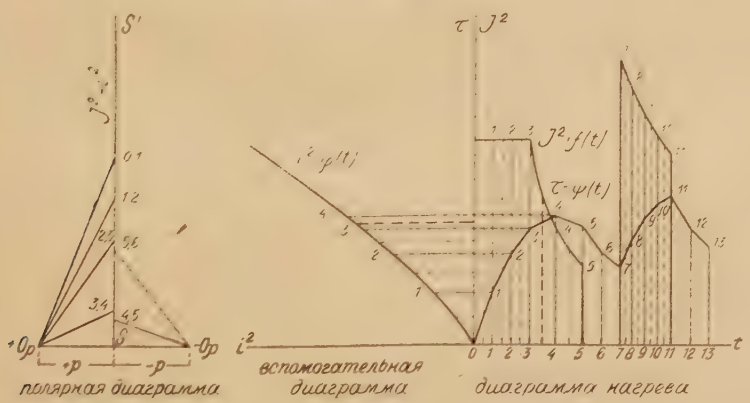
не значения различных физических величин, а значения соответствующих им отрезков. В этом случае

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau \cdot \mu_\tau}{dt \cdot \mu_t} = \frac{(I^2 - i^2)\mu_i^2}{\frac{G \cdot q}{r} \cdot \mu_p}.$$

Уравнение, связывающее между собою значения всех масштабов, должно иметь вид

$$\frac{\mu_\tau}{\mu_t} = \frac{\mu_i^2}{\mu_p}.$$

Из всех четырех значений масштабов три могут быть выбраны совершенно произвольно и только четвертый должен быть вычислен при помощи приведенного уравнения.



Фиг. 118.

Если обозначить $\frac{G \cdot q}{r} = \rho$ (радиус-вектор) и считать, что $d\tau \cdot \mu_\tau = d\tau$, $dt \cdot \mu_t = dt$ и т. д., то окончательное соотношение между отрезками, необходимое для графического определения кривой нагревания, представляет:

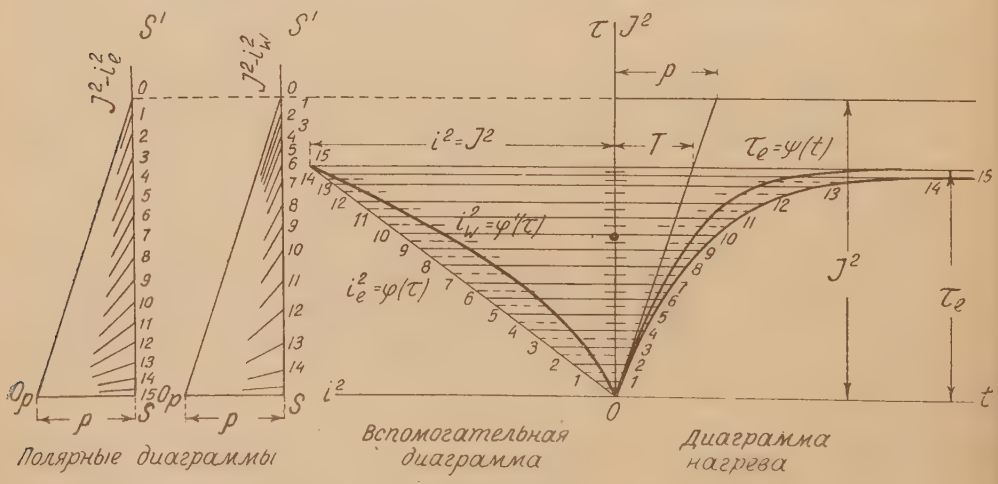
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau}{dt} = \frac{\overline{I^2} - \overline{i^2}}{\rho}.$$

Самое построение легче всего уяснить из чертежа фиг. 118. На основной диаграмме нагревания наносится кривая $I^2 = f(t)$, а на вспомогательной диаграмме — найденная опытным путем для некоторых средних условий охлаждения кривая $i^2 = \varphi(\tau)$. На полярной диаграмме за основной параметр принимается радиус-вектор

$$\rho = \frac{G \cdot q}{r}$$

Пусть искомая кривая $\tau = \psi(t)$ уже построена до некоторой определенной точки, например 3, и должна быть продолжена дальше. Для этого выбирают на диаграмме нагревания любой промежуток времени 3—4 и при помощи кривой $I^2 = f(t)$ находят для него среднее значение $I^2_{3,4}$. Затем задаются на кривой $\tau + \psi(t)$ приблизительным значением τ_4 и для полученной таким образом разности повышений температур $\tau_3 - \tau_4$ находят по кривой $i^2 = \varphi(\tau)$ вспомогательной диаграммы средние значение $i^2_{3,4}$. Определив разность $I^2_{3,4} - i^2_{3,4}$, откладывают полученное значение на полярной диаграмме от точки S по оси SS' и соединяют полученную точку 3,4 с точкой $+O_p$ и тогда наклон луча $+O_p - 3{,}4$ определяет мгновенный угол наклона $\alpha_{3,4}$ кривой $\tau = \psi(t)$. Проводя из точки 3 кривой $\tau = \psi(t)$ луч под углом $\alpha_{3,4}$ до пересечения с ординатой точки 4 определяют положение точки 4 на кривой $\tau = \varphi(t)$. Найденная таким образом точка должна совпадать с принятым раньше значением τ_4, если же этого не случится, то задаются другим значением τ_4 и производят то же построение до тех пор, пока не получится совпадение. Выбирая далее любой промежуток времени 4—5, производят те же построения и находят значение τ_5. Таким образом шаг за шагом можно построить кривую $\tau = \psi(t)$.

Данный метод построения кривой нагрева по сравнению с обычным методом, требующим построения подкасательных, имеет многие пре-



Фиг. 119.

имущества. В то время как метод подкасательных основан на идеальном предположении, что кривая нагрева при постоянной нагрузке изменяется по строго экспоненциональному закону, в данном случае можно допустить любой характер изменения кривой нагрева. Это удобнее объяснить с помощью чертежа на фиг. 119.

Для данной постоянной нагрузки $I^2 = Const$ на фиг. 119 вычерчены две кривые нагревания, имеющие обе одинаковое максимальное повышение температуры, равное τ_m. Кривая $\tau_m = \xi(t)$ изображает действительный температурный процесс, а кривая $\tau_e = \psi(t)$ представляет собою строго экспоненциальную кривую, причем касательные, проведенные в начале этих кривых, совпадают. При протекании температурного процесса по строго экспоненциальному закону, в общем следует, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d\tau}{dt} = \frac{I^2 - i^2}{\rho} = \frac{\tau_m - \tau}{T\mu_t}.$$

Так как I^2 и ρ с одной стороны, и τ_m и $T\mu_t$, с другой стороны — постоянны, то отсюда следует, что i_e^2 пропорциональны τ и зависимость $i_e^2 = \varphi(\tau)$ выражается на вспомогательной диаграмме лучом, проходящим через начало координат 0. Вторая точка, определяющая положение данного луча, находится из условия, что при $\tau = \tau_m$ должно быть $i^2 = I^2$.

По действительной кривой нагревания $\tau_w = \xi(t)$ можно построить соответствующую ей кривую $i_w^2 = \varphi'(\tau)$. Для этого проводят в любой точке кривой $\tau_w = \xi(\tau)$ касательную к данной кривой и на полярной диаграмме через точку 0 луч, параллельный этой касательной, который на оси SS' отсекает отрезок равный $I^2 - i_w^2$. Так как $I^2 = Const$, то таким образом легко можно находить значения i_w^2, соответствующие различным значениям τ_w и построить искомую кривую $i_w^2 = \varphi'(\tau)$. Для сравнения на чертеже приводится построение для кривой $i_e^2 = \varphi(\tau)$ в случае экспоненциальной кривой $\tau_e = \psi(t)$ при одинаковых ρ и τ_m.

Построенная таким образом кривая $i_w^2 = \varphi'(\tau)$ довольно значительно отклоняется от прямой $i_e^2 = \varphi(\tau)$.

Таким образом, при данном методе можно без затруднения воспользоваться точной зависимостью $i_w^2 = \varphi'(\tau)$, почему этот метод с самого начала является более точным, чем метод подкасательных. На фиг. 119 указана также связь между значением ρ и значением отрезка, выражающего постоянную времени нагрева T, причем следует отметить особый случай масштаба $\rho = T\mu_t$ при $I^2 = \tau_m$.

Дальнейшее преимущество этого метода состоит в свободе выбора масштабов, благодаря чему каждая кривая может быть построена в наиболее благоприятном для нее виде.

Наконец, преимущества этого метода по сравнению с методом подкасательных является то, что в данном случае можно оперировать не с кривой $\tau_e = \psi(\tau)$, а непосредственно с кривой $I^2 = f(t)$, а также то, что здесь можно гораздо легче работать при исследованиях колеблющейся нагрузки, чем по методу подкасательных.

*

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ НАГРЕВА К РАСЧЕТУ ЭЛЕМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ РЕОСТАТОВ

*

§ 31. Кратковременная нагрузка. — Ранее было выведено (см. стр. 96), что процесс нагрева однородного тела за малый промежуток времени, в течение которого отдачи тепла наружу не происходит, выражается математически следующей формулой:

$$Pdt = G \cdot q \cdot d\vartheta.$$

Если однородным телом является какой-либо электрический проводник с сопротивлением R, который при прохождении тока нагревается, то в этом случае процесс нагрева может быть представлен таким образом:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = G \cdot q \cdot d\vartheta, \qquad .61$$

где

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s}.$$

Как известно, удельное сопротивление электрического проводника зависит от температуры; эта зависимость в общем виде выражается следующим образом:

$$\rho_\vartheta = \rho_o (1 + a_1\vartheta + a_2\vartheta^2 + a_3\vartheta^3 + \cdots),$$

где a — так называемые температурные коэффициенты сопротивления. В пределах от 0 до 100° C изменение сопротивления в зависимости от температуры можно представить происходящим по прямолинейному закону, т. е.

$$\rho_\vartheta = \rho_o (1 + \alpha\vartheta).$$

Точно так же, теплоемкость тел зависит от температуры; в пределах от 0 до 100°C эта зависимость может быть с достаточным приближением выражена прямолинейной функцией, т. е.

$$q = q_o (1 + \sigma\vartheta)$$

где σ — температурный коэффициент теплоемкости тела, и таким образом:

$$G \cdot q \cdot dt = G \cdot q_o (1 + \sigma\vartheta)\, dt.$$

Обычно значение σ для материалов, применяющихся для изготовления реостатов, очень малы, поэтому при расчетах можно допустить, что $\sigma = 0$, $q = Const = q_o$.

Значения коэффициентов α и σ приведены в таблице 22:

Если сопротивление проводника не остается постоянным при изменениях температуры его, а по самому проводнику проходит ток постоянной силы, то предыдущее уравнение 61 может быть написано так:

$$Pdt = I^2 R\, dt = I^2 R_o (1 + \alpha\vartheta) = G \cdot q_o d\vartheta.$$

Пусть сечение провода есть $s\, cm^2$, длина его — l cm, а ρ_o — удельное сопротивление при $\vartheta = 0$ в Ωcm и γ — удельный вес в $\frac{g}{cm^3}$, то тогда

$$I^2 \rho_o (1 + \alpha\vartheta) \frac{l}{s} = s \cdot l \cdot \gamma \cdot q_o \cdot d\vartheta.$$

Отсюда получается, что

$$\frac{\rho_o}{\gamma \cdot q_o} \cdot \frac{I^2}{s} dt = \frac{\rho_o}{\gamma \cdot q_o} \cdot i_s^2 dt = \frac{d\vartheta}{1 + \alpha\vartheta}$$

или

$$a_o \cdot i_s^2 dt = \frac{d\vartheta}{1 + \alpha\vartheta}, \qquad 62$$

где

$$a_o = \frac{\rho_o}{\gamma \cdot q_o}$$

и

$$i_s = \frac{I}{s} \text{ — плотность тока в } \frac{A}{cm^2}.$$

Для установления зависимости температуры от времени уравнения 62 интегрируется:

$$a_o \cdot i_s^2 \int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{1 + \alpha\vartheta} = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{d(1 + \alpha\vartheta)}{1 + \alpha\vartheta},$$

что дает в конечном результате

$$\alpha \cdot a_o \cdot i_s^2 \cdot t_a = \ln (1 + \alpha\tau), \qquad 63$$

где t_a — продолжительность нагрева тела, $\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1$ — повышение температуры тела за период нагрева.

Таблица 22.

Материал	Удельная теплоемкость q $\frac{Watt}{g^\circ C}$	Удельный вес γ $g/cm.^3$	Температурный коэффициент сопротивления α $\frac{\%}{^\circ C}$	Удельное сопротивление ρ $\frac{\Omega mm^2}{m}$	Теплопроводность λ $\frac{Watt}{cm\,^\circ C}$
I. Металлы:					
Алюминий	0,88 ÷ 0,91	2.6 ÷ 2,75	0,388	0,0287 ÷ 0,0308	1,5 ÷ 2,0
Свинец	0,13	11,25 ÷ 11,37	0,387	0,208	0,35
Бронза (Cu, Sn или Zn и Cd)	0,376	8,5 ÷ 8,8	—	0,132 ÷ 0,056	—
Чугун	0,54	7,5	—	0,7 ÷ 1.0	0.46
Сталь	0,48	7,8	—	0.12	0.6
Железная проволока	0,46 ÷ 0,473	7.6 ÷ 7.7	0,480	0,104	—
Медь	0,39	8.9	0.38 ÷ 0,44	0,0176	3,5
Латунь	0,385 ÷ 0,393	8,5 ÷ 8,7	0,165	0.065 ÷ 0,075	0.93
Константан (Basse und Selve, Altena)	0,398	8,76	—0,005	0,49	-
» (Dr. Geitner, F. A. Lange, Ane)	0,444	8,86	—0,005	0,47	-
Крупин	0,0515	8,10	0,070	0.85	—
Манганин (Isabellenhütte, Dillenbourg)	0,405	8,28	0,01	0,43	—
» (V. D. Nickelwerke, Schwerte)	0,435	8,12	0,01	0.43	—
Нейзильбер	0,396 ÷ 0,405	8,3 ÷ 8,5	0.036	0,319	—
» II (V. D. Nickelwerk., Schw.)	0,394	8.82	0.0187	0,39	0,34
Никель	0,46	8,9 ÷ 9,2	0,365	0,132	0,58
Никелин	0,335 ÷ 0,419	9,64	0,019 ÷ 0,028	0,556 ÷ 0,455	—
» (Basse und Selve, Altena)	0,398	8,91		0,34	—
» (Dr. Geitner, F. A. Lange, Ane)	0,389	8,72	0,022	0,40	—

Материал	Удельная теплоемкость q $\frac{Watt}{^\circ C\, g}$	Удельный вес γ $g.cm^3$	Температурный коэффициент сопротивления α $\frac{^0/_0}{^\circ C}$	Удельное сопротивление ρ $\frac{\Omega mm^2}{m}$	Тепло-проводность λ $\frac{Watt}{cm\, C^\circ}$
Никелин I (V. D. Nickelw., Schwerte)	0,435	8,12	0,0076	0,42 ÷ 0,436	—
» II (V. D. Nickelw., Schwerte)	0,398	8,88	0,0168	0,34	—
Платина	0,135	21,5	0,243	0,0695	—
Ртуть	0,138	13,6	0,0907	0,942	—
Резистан (Issabellenhütte. Dillenbourg)	0,49	8.25	—	0,51	—
Реотан	0,389	8,54 ÷ 8,8	0,023	0,473 ÷ 0,48	0,23
Серебро	0,234	10,5	0,377	0,016 ÷ 0,017	4,2
Цинк	0,394	7,1 ÷ 7,2	0.365	0,059 ÷ 0,060	1,1
Олово	0,23	7,4	—	0,12	0,64
II. Изолирующие материалы:					
Азбест	0,82	2,5	—	—	0,002
Асфальт	—	1,3	—	—	—
Зола	0,84	—	—	—	—
Хлопчатая бумага	—	1,5	—	—	0,00016
Гипс	0,84	0,97	—	—	0,007
Стекло	0,84	2,6	—	—	0,006
Слюда	0,84	2,9	—	—	0,0036
Гранит	0,84	2,8	—	—	0,035
Графит	0,75 ÷ 0,83	2,1	—0,09	12,0	0 05
Твердый каучук	—	—	—	—	0,00037
Дуб	2,4	0,86	—	—	0,017 =

Материал	Удельная теплоемкость q $\frac{Watt}{^\circ C\, g}$	Удельный вес γ g/cm^3	Температурный коэффициент сопротивления α $\frac{\%}{^\circ C}$	Удельное сопротивление ρ $\frac{\Omega mm^2}{m}$	Теплопроводность λ $\frac{Watt}{cm\, ^\circ C}$
Сосна	2,7	0,50	—	—	0,0012 ═ 0,00035 ⊥
Воздух	1,00	0,00119	—	—	0,00023
Мрамор	0,88	2,7	—	—	0,0064
Миканит	—	—	—	—	0,0012
Бумага	—	0.9	—	—	0,0019
Керосин	2,1	0,8	—	—	0.0015
Фарфор	1,05	2.3	—	—	0,0104
Прессшпан	—	—	—	—	0,0017
Парафин	2.5	0,89	—	—	0,0026
Масло минеральное	1.7 ÷ 1,8	0,92	—	—	0.0016
Песок	1,33	1,5	—	—	0,0031
Песчаник	0,92	2.3	—	—	0,02
Шеллак	—	—	—	—	0,0025
Шифер	—	2,7	—	—	0,02
Шлак	0,75	—	—	—	—
Шелк	—	—	—	—	0,00092
Цемент		3.0	—	—	0,0007

Отсюда находится и

$$\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{1}{\alpha}\left(e^{\alpha \cdot a_0 \cdot i_s^2 \cdot t_a} - 1\right). \qquad 64$$

Графически зависимость τ от t представлена на фиг. 120, причем кривая 1 относится к случаю, когда $\alpha > 0$ (для металлических проводников), а кривая 2 — к случаю, когда $\alpha < 0$ (для электролитов).

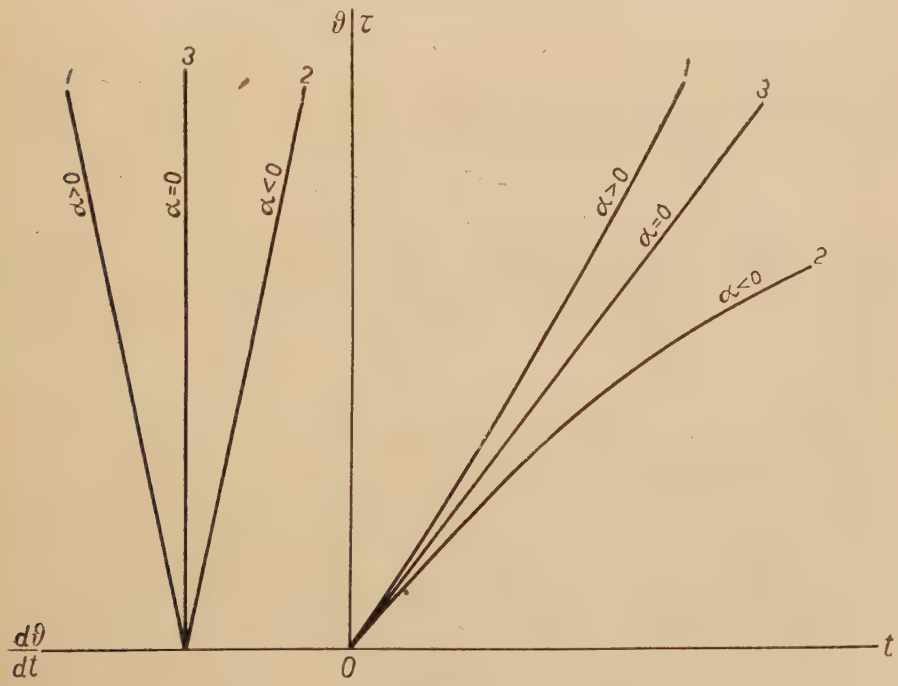
Из уравнения 62 следует, что

$$\frac{d\vartheta}{dt} = a_0 . i_s^2 \ (1 + \alpha\vartheta).$$

Так как при $I = Const$, $i_s = \frac{I}{s} = Const_1$, то

$$\frac{d\vartheta}{dt} = Const_2 \ (1 + \alpha\vartheta). \qquad 65$$

Кривые $\frac{d\vartheta}{dt} = f(\vartheta)$ изображены на диаграмме фиг. 120 в виде прямых 1 — 2 — 3. В частном случае, когда $\alpha = 0$, что имеет место для



Фиг. 120.

проводников, изготовляемых из специальных сплавов различных металлов (константан, манганин, круппин и др.), повышение температуры по

времени происходит по прямолинейному закону (см. кривая 3 фиг. 120) и тогда из уравнения 62 следует, что

$$\tau = a_o \cdot i_s^2 \cdot t_a, \qquad 66$$

и

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau}{t_a} = a_o \cdot i_s^2 = Const. \qquad 67$$

Формулы 64 и 66 показывают, что повышение температуры τ возрастает с увеличением $a_o = \frac{\rho_o}{\gamma \cdot q_o}$.

Отсюда следует, что для уменьшения τ необходимо брать проводники с возможно малым удельным сопротивлением, но большой удельной теплоемкостью q_o и с большим удельным весом γ.

Если сопротивление R, по которому проходит электрический ток I, состоит из целого ряда, последовательно соединенных сопротивлений $R_1, R_2 \ldots R_n$, обладающих физическими постоянными $\alpha_1, \alpha_2 \ldots \alpha_n$ и $q_1, q_2 \ldots q_n$, то процесс нагрева такого сложного тела при кратковременной нагрузке в предположении, что температура всех его частей устанавливается всюду одинаковой, представляется математически в таком виде:

$$P\,dt = I^2 \cdot R\,dt = I^2\,[R_{o1}(1 + \alpha_1\vartheta) + R_{o2}(1 + \alpha_2\vartheta) + \ldots +$$

$$+ R_{on}(1 + \alpha_n\vartheta)]\,dt = (G_1 \cdot q_1 + G_2)q_2 + \ldots + G_n \cdot q_n)d\vartheta.$$

Это выражение может быть заменено ранее приведенным уравнением 61:

$$I_2 \cdot R_o\,(1 + \alpha\vartheta)\,dt = G \cdot q \cdot d\vartheta \qquad 61'$$

причем здесь должны пониматься под α и q средние весовые значения температурных коэффициентов сопротивления и удельных теплоемкостей, т. е.

$$\alpha = \frac{\alpha_1 R_{o1} + \alpha_2 R_{o2} + \ldots + \alpha_n \cdot R_{on}}{R_{o1} + R_{o2} + \ldots + R_{on}} = \frac{\Sigma_1^n \alpha_k R_{ok}}{\Sigma_1^n R_{ok}} = \frac{\Sigma_1^n \alpha_k \cdot R_{ok}}{R_o}$$

$$q = \frac{q_1 G_1 + q_2 G_2 + \ldots + q_n G_n}{G_1 + G_2 + \ldots + G_n} = \frac{\Sigma_1^n q_k G_k}{\Sigma_1^n G_k} = \frac{\Sigma_1^n q_k \cdot G_k}{G}.$$

Здесь означают: R_o — общее сопротивление при $\vartheta = 0$, а

G — общий вес.

Решение дифференциального уравнения 61′ позволяет найти повышение температуры $\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1$ за промежуток времени $t_a = t_1 - t_2$

$$\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1 = (e^A - 1)\left(\frac{1}{\alpha} - \vartheta_1\right), \qquad 68$$

где

$$A = \frac{I^2 \cdot R_0 \cdot \alpha}{G \cdot q};$$

$$\text{при } \vartheta_1 = 0 \quad \tau = \frac{1}{\alpha}(e^A - 1).$$

Последнее уравнение показывает, что с увеличением общей теплоемкости повышение температуры уменьшается. При $\alpha = 0$

$$\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{I^2 \cdot R \cdot t_a}{G \cdot q} = \frac{I^2 \Sigma_1^n R \cdot t_a}{\Sigma_1^n G_k \cdot q_k}. \qquad 69$$

Уравнения 68 и 69 могут быть использованы и для таких случаев, когда для повышения общей теплоемкости элементы сопротивления реостатов имеют основу из фарфора или из другого огнеупорного изоляционного материала, или заполняются песком, цементом, азбестом, или погружаются в жидкость (масло).

Кратковременная нагрузка весьма часто имеет место в реостатах, служащих только для пуска в ход двигателей небольшой мощности (до 20kW), а не для регулировки скорости вращения, причем после каждого пуска реостату дается время для полного охлаждения. Реостаты, рассчитанные на кратковременную нагрузку, снабжаются обычно соответствующими надписями, обращающими внимание на этот вид нагрузки, или указывающими допустимую предельную продолжительность.

Максимальная допустимая продолжительность нагрузки составляет:

a) для сопротивлений с воздушным охлаждением $t_a < 120$ *sec.*,

b) для пакетных сопротивлений $t_a < 300$ *sec.*

§ 32. Продолжительная нагрузка. — Согласно нормам под продолжительной нагрузкой понимается такая нагрузка, продолжительность которой настолько велика, что температура нагревающегося тела достигает практически установившегося состояния. При этих условиях все тепло, сообщаемое телу, отдается в окружающую среду.

Тепловой процесс для продолжительной нагрузки электрических сопротивлений характеризуется следующим уравнением:

$$Pdt = I^2 dt = G \cdot q \cdot d\vartheta + o \cdot S \cdot \vartheta dt, \qquad 70$$

где o — коэффициент теплоотдачи,

S — охлаждающая поверхность сопротивления.

Так как

$$R = R_o(1 + \alpha\vartheta),$$

$$q = q_o(1 + \sigma\vartheta),$$

то

$$I^2 \cdot Rdt = I^2 \cdot R_o(1 + \alpha\vartheta)\,dt = G \cdot q_o(1 + \sigma\vartheta)\,d\vartheta + oS \cdot \vartheta \cdot dt,$$

откуда

$$\frac{I^2 R_o}{o \cdot S}(1 + \alpha\vartheta)\,dt = \frac{G \cdot q_o}{o \cdot S}(1 + \sigma\vartheta)\,dt + \vartheta dt$$

или

$$M(1 + \alpha\vartheta)\,dt = T(1 + \sigma\vartheta)\,d\vartheta + \vartheta \cdot dt. \qquad 71$$

Здесь величина $\frac{G \cdot q_o}{o \cdot S} = T$ представляет из себя, как известно, постоянную времени нагрева. Если нагрев проводника происходит при $I = Const$, то другая величина $\frac{I^2 R_o}{o \cdot S} = M$ — приобретает также постоянное значение. По своему физическому смыслу величина $\frac{I^2 R_o}{o \cdot S}$, представляет температуру, которой достиг бы проводник при продолжительном действии тока, если бы сопротивление проводника оставалось постоянным независимо от температуры. Действительно, при продолжительной нагрузке, когда $\vartheta_2 = Const$ количество тепла, идущего на повышение температуры, т. е. $G \cdot q \cdot d\vartheta$ делается равным нулю, поэтому

$$\frac{I^2 \cdot R_o}{o \cdot S}(1 + \alpha\vartheta_2)\,dt = \vartheta_2 dt;$$

отсюда

$$M(1 + \alpha\vartheta_2) = \vartheta_2$$

$$M = \frac{\vartheta_2}{1 + \alpha\vartheta_2},$$

при $\alpha = o$

$$M = M_o = \vartheta_2'.$$

Из уравнения 71 следует, что

$$dt = T \cdot \frac{1 + \sigma\vartheta}{M + (\alpha M - 1)\vartheta}\,dt.$$

Решение этого дифференциального уравнения дает в конечном результате

$$\frac{t}{T_o} = \frac{1}{(\alpha M - 1)^2}\{[(\alpha - \sigma)M - 1]\ln(M + \alpha M\vartheta - \vartheta)] +$$

$$+ \sigma(\alpha M - 1)\vartheta\} + Const. \qquad 72$$

Это уравнение представляет общее математическое выражение процесса нагрева электрического сопротивления при прохождении тока постоянной силы, т. е. при $I = Const$.

В частных случаях когда $\alpha \neq 0$, а $\sigma = 0$

$$\frac{t}{T} = \frac{1}{(\alpha M - 1)} \ln (M + \alpha M \vartheta - \vartheta);$$

при $\sigma = 0$ и $\alpha = 0$

$$\frac{t}{T} = -\ln (M_o - \vartheta) + Const = -\ln (\vartheta_2' - \vartheta) + Const.$$

Нагрев сопротивления при продолжительной нагрузке математически характеризуется тем, что

$$Gq \cdot d\vartheta = 0 \quad \text{и} \quad t \cong \infty.$$

При этом условии, как было уже выведено ранее,

$$M = \frac{I^2 \cdot R_o}{\sigma \cdot S} = \frac{\vartheta_2}{1 + \alpha \vartheta_2}.$$

Отсюда находятся: установившаяся температура ϑ_2:

$$\vartheta_2 = \frac{M}{1 - \alpha M}$$

и повышение температуры $\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1$.

$$\tau = \vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{M}{1 - \alpha M} - \vartheta_1 = \frac{M + \alpha M \vartheta_1 - \vartheta_1}{1 - \alpha M}. \qquad 73$$

Последнее уравнение показывает, что для определения повышения температуры τ при продолжительной нагрузке сопротивления в знании теплоемкости c последнего нет никакой необходимости.

Если прохождение тока по сопротивлению R, имеющему температуру ϑ_2 прекратить, то сопротивление начинает охлаждаться. В случае охлаждения сопротивления при $I = 0$ зависимость температуры от времени может быть математически выражена на основании уравнения 71, для чего необходимо приравнять $M = 0$; таким образом получается

$$T(1 + \sigma\vartheta)\, d\vartheta + \vartheta dt = 0,$$

отсюда находится

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta} - \sigma (\vartheta_2 - \vartheta). \qquad 74$$

Как видно из уравнения 74, в процессе охлаждения электрического сопротивления играют существенную роль его постоянная T,

зависящая от теплоемкости q_0, и температурный коэффициент теплоемкости σ.

В частном случае, когда $\sigma = 0$, что вполне можно допустить для практических расчетов, математическое выражение процесса охлаждения представляется в общеизвестном виде:

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta}.$$

Продолжительной нагрузке подвергаются все реостаты: 1) служащие для частого пуска в ход двигателей, а также для регулировки скорости вращения их, 2) предназначаемые для регулировки силы тока в цепях возбуждения электрических машин, 3) включаемые в цепь тока на продолжительное время вообще в качестве добавочного регулирующего или постоянного сопротивления.

§ 33. Расчет элементов сопротивлений на нагрев при продолжительной нагрузке. *а.* Зависимость объема материала от формы сечения проводника. — Ранее выведенные уравнения, выражающие математически процесс нагрева электрических проводников при прохождении тока, показывают, что для определения геометрических размеров сопротивлений необходимо знать две характеристические величины: поглощаемую мощность P и постоянную времени нагрева T, а также выяснить значение удельного сопротивления материала сопротивления и влияние и формы проводника на условия охлаждения сопротивления при продолжительной нагрузке.

Если какое-либо сопротивление выполнено из проводника с равномерным поперечным сечением s_1 и длиною l_1, то при прохождении тока I, поглощаемая мощность составляет, как известно:

$$P_1 = I^2 \frac{\rho_1 \cdot l_1}{s_1}.$$

где ρ_1 — удельное сопротивление этого проводника.

При прохождении того же тока I по другому проводнику, имеющему длину l_2, поперечное сечение s_2 и удельное сопротивление ρ_2, поглощаемая мощность P_2 равна:

$$P_2 = I^2 . \frac{\rho_2 \cdot l_2}{s_2}.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1 \cdot l_1 \cdot s_2}{\rho_2 \cdot l_2 . s_1}.$$

При продолжительной нагрузке вся поглощаемая энергия отдается во внешнюю окружающую среду. Таким образом

$$P_1 = o_1 \cdot S_1 \cdot \tau_1,$$

а

$$P_2 = o_2 \cdot S_2 \cdot \tau_2,$$

где: S_1 и S_2 — поверхности охлаждения сопротивлений,

o_1 и o_2 — коэффициенты теплоотдачи,

τ_1 и τ_2 — повышения температуры при установившемся состоянии нагрева.

Если оба сопротивления поставить в одинаковые условия теплоотдачи ($o_1 = o_2$), то оба сопротивления при нагреве проходящим током будут иметь одинаковые повышения температуры тогда, когда

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{S_1}{S_2}.$$

Пусть периметры поперечных сечений проводников суть u_1 и u_2, тогда $S_1 = u_1 \cdot l_1$, а $S_2 = u_2 \cdot l_2$. Периметр поперечного сечения проводника зависит от размера площади и формы сечения; в общем виде можно представить, что

$$u = Const \cdot s^{\nu}$$

Если сравниваемые два проводника имеют одинаковые формы сечений, то на основании всех вышеприведенных положений следует что

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{u_1 \cdot l_1}{u_2 \cdot l_2} = \left(\frac{s_1}{s_2}\right) \cdot \frac{l_1}{l_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{s_2}{s_1}.$$

Отсюда получается:

$$\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{1}{\nu + 1}}.$$

Объемы материала проводников соответственно составляют:

$$V_1 = s_1 \cdot l_1,$$

$$V_2 = s_2 \cdot l_2;$$

и легко увидеть, что отношение этих объемов равно:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{s_1 \cdot l_1}{s_2 \cdot l_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1-\nu}{1+\nu}}.$$

В построении реостатов имеет большое значение не только объем материала сопротивлений, но также и общая длина проводника, из которого изготовляется сопротивление. В этом случае отношение длин равняется:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{P_1}{P_2} \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{-\frac{\nu}{1-\nu}}.$$

Для изготовления металлических реостатов применяется главным образом проволока круглого и прямоугольного сечения, а также в виде лент.

В случае применения для изготовления сопротивлений круглой проволоки диаметром d, периметр ее равен:

$$u = \pi d = 2\sqrt{\pi d} = Const \cdot \sqrt{d}.$$

Отсюда следует, что

$$\nu = \frac{1}{2}.$$

Таким образом при одинаковых поглощаемых мощностях в сопротивлениях получается, что

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{и} \quad \frac{l_1}{l_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{-\frac{1}{3}},$$

т. е. для поглощения одной и той же мощности в сопротивлениях из круглой проволоки приходится брать объем больше, а длину проволоки меньше при применении материала с бо́льшим удельным сопротивлением.

При применении в качестве сопротивления тонкой металлической ленты, вытянутой прямолинейно, можно считать, что периметр, вследствие малых размеров толщины и ширины ленты, почти не зависит от площади поперечного сечения т. е. $\nu = 0$, и в таком случае:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}; \qquad \frac{l_1}{l_2} = 1;$$

Эти формулы показывают, что для поглощения одинаковых мощностей объемы материалов должны быть пропорциональны удельным сопротивлениям, а длины лент должны быть равны.

Если по двум различным ленточным сопротивлениям проходят токи одной и той же силы ($I_1 = I_2$), и в них поглощаются одинаковые

мощности ($P_1 = P_2$), то в этом случае периметр u пропорционален площади поперечного сечения s; тогда $\nu = 1$ и отсюда

$$\frac{V_1}{V_2} = 1 \text{ и } \frac{l_1}{l_2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{-\frac{1}{2}}.$$

т. е. объемы материала сопротивлений одинаковы, в то время как длина проводника с большим удельным сопротивлением — меньше.

Разобранные случаи применения проводников различных форм сечения являются наиболее часто встречающимися в практике.

Для размещения элементов сопротивления в определенном пространстве в большинстве случаев объем материала играет малую роль; большее значение для этого имеет общая длина проводника, которая уменьшается с увеличением ρ (за исключением случая, когда $\nu = 0$), поэтому в практике для изготовления металлических реостатов стремятся применять сплавы с большим удельным сопротивлением. Кроме того в большинстве случаев к материалу сопротивления предъявляется еще требование, чтобы его электрические свойства (удельное сопротивление) в пределах допустимого нагрева оставалось практически постоянным. К числу таких материалов относятся, главным образом, сплавы из никеля и меди.

b. Зависимость повышения температуры от нагрузочного тока. — Для практических целей представляет большой интерес знать, какое повышение температуры вызывает данный нагрузочный ток при прохождении по сопротивлению, в виде свободно подвешенной проволоки, и, наоборот, какой можно допустить ток с тем, чтобы повышение температуры тела проволочного сопротивления не превосходило заданных пределов.

Как отмечено ранее, охлаждение свободно натянутой проволоки зависит от трех факторов, практически друг от друга неотделимых, а именно:

a) от отвода тепла вследствие теплопроводности окружающей среды,

b) от теплоотдачи посредством конвекции,

c) от теплоотдачи путем лучеиспускания.

Как известно, теплоотдача вследствие теплопроводности прямо пропорциональна разности температур проволоки и окружающей среды; отвод тепла путем конвекции пропорционален второй степени разности температур, а отдача тепла посредством лучеиспускания пропорциональна четвертой степени. В большинстве случаев, для упрощения практических расчетов делают допущение, что все виды теплоотдачи (теплопроводность, конвекция и лучеиспускание)

пропорциональны первой степени разности температур, и на основании этого положения было выведено, что:

$$I^2 = \frac{o \cdot \tau}{\rho} \cdot u \cdot s \,, \qquad 75$$

отсюда

$$I = \sqrt{\frac{o\tau}{\rho} \cdot u \cdot s} \,, \qquad 76$$

и

$$\tau = \frac{I^2 \cdot \rho}{o \cdot u \cdot s} \,. \qquad 77$$

В случае же необходимости более точного определения допустимых значений I и τ, или в тех случаях, когда нагретая проволока имеет высокую температуру, только что приведенные формулы не могут быть применимы, и тогда рекомендуется пользоваться эмпирической формулой, предложенной Ф. Штэблейном (F. Stäblein):

$$I^2 = \frac{s}{\rho_\tau} \cdot (a_\tau + u \cdot b_\tau),$$

где

$$s \text{ — в } mm^2,$$

$$\rho_\tau \text{ — в } \frac{\Omega\, mm^2}{m},$$

$$u \text{ — в } mm,$$

a_τ и b_τ — опытные коэффициенты, значения которых для различных повышений температур приведены в таблице 23.

Таблица 23.

τ	a_τ	b_τ	τ	a_τ	b_τ
100	5	1,4	800	80	84
200	10	3,7	900	100	117
300	16	8,0	1000	123	158
400	21	14,5	1100	150	208
500	35	24	1200	181	268
600	48	38	1300	217	339
700	63	58	—	—	—

Для $\tau = 200°$ C, что имеет место в реостатах промышленного типа, предыдущая формула может быть представлена в следующем виде:

$$I^2 = \frac{s \cdot \tau}{\rho_\tau} (0{,}05 + 0{,}017\, u),$$

$$I = \sqrt{\frac{s \cdot \tau}{\rho} (0{,}05 + 0{,}017\, u)} \,,$$

В практике иногда производят определение значения нагрузочного тока I по допустимой плотности тока i_s; в частности для круглой проволоки

$$I = i_s \cdot \frac{\pi}{4} d^2.$$

Полагая $i_s = Const$, можно иметь следующее выражение для I:

$$I = \beta_1 . d^2 = \beta_1 \sqrt[6]{d^{12}}. \qquad 78$$

Однако нагрев проволоки зависит не только от плотности проходящего тока, но также и от условий охлаждения, от количества тепла, отводящегося с единицы наружной поверхности. Из формул следует, что для круглых проволок:

$$I = \beta_2 \sqrt{d^3} = \beta_2 \sqrt[6]{d^9}. \qquad 79$$

Опыт показывает, что при расчете круглых тонких проволок по формуле 76 получаются несколько уменьшенные значения нагрузочного тока, а при применении формулы 79 — преувеличенные. Достаточно удовлетворительные результаты можно получить, применяя эмпирическую формулу:

$$I = \beta \sqrt[6]{d^{10}} = \beta \sqrt[3]{d^5} = \beta d \sqrt[3]{d^2} \ A,$$

$$i_s = \frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\beta}{\pi \sqrt[3]{d}} \ A/mm^2. \qquad 80$$

Постоянная β имеет следующие значения для проволок, обладающих удельным сопротивлением $\rho = 0{,}48 \div 0{,}52 \ \frac{\Omega \, mm^2}{m}$:

для продолжительной нагрузки $\beta_d = 3{,}5$,

для прерывистой продолжительной нагрузки

$$\beta_a = \beta_d \sqrt{\frac{t_a + t_b}{t_a}},$$

для сопротивления песочным охлаждением

$$\beta_o = \sqrt{20}\, \beta_d = 15{,}6.$$

§ 34. Влияние формы сопротивления. — В общем виде это влияние легко устанавливается на основании равенства:

$$P_1 = I^2 . \frac{\rho \cdot l}{s} = o \cdot S \cdot \tau,$$

откуда

$$I^2 = \frac{o \cdot S \cdot \tau \cdot s}{\rho . l} = \frac{o \cdot S}{\rho \cdot l} \cdot s \cdot \tau = \frac{o \cdot \tau}{\rho} u \cdot s.$$

Величина $u \cdot s$ для различных форм сечений имеет следующие значения:

a) круглое сечение

$$u \cdot s = \pi \cdot d \cdot \frac{\pi}{4} d^2 = \frac{\pi^2}{4} d^3 \cong 2{,}5\, d^3.$$

b) полое круглое сечение

$$u = \pi d_1; \quad s = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2),$$

где d_1 — внешний диаметр, а d_2 — внутренний диаметр; таким образом,

$$u \cdot s = \frac{\pi^2}{4} (d_1^3 - d_2^3 d_1),$$

при $d_1 = m d_2$ получается:

$$u \cdot s \cong 2{,}5\, d_1^3 \left(1 - \frac{1}{m^2}\right),$$

c) прямоугольное сечение (см. фиг. 121)

Фиг. 121.

$$u \cdot s = 2(\delta + b)\delta b$$

при $b = x\delta$

$$u \cdot s = 2\left(\frac{b}{x} + b\right)\frac{b^2}{x} = 2b^3\left(\frac{x+1}{x^2}\right),$$

d) квадратное сечение

$$u \cdot s = 4b \cdot b^2 = 4b^3.$$

Если посредством A обозначить главный размер поперечного сечения проводника, то формулы 75—77 могут быть представлены в следующем виде:

$$I^2 = \frac{\sigma \cdot \tau}{\rho} \cdot z \cdot A^3, \qquad 75'$$

допустимая сила тока

$$I = \sqrt{\frac{\sigma \cdot \tau}{\rho} z \cdot A^3}, \qquad 76'$$

повышение температуры

$$\tau = \frac{\rho}{\sigma} \cdot \frac{I^2}{z A^3},$$

главный размер проводника

$$A = \sqrt[3]{\frac{\rho}{\sigma \cdot \tau} \cdot \frac{I^2}{z}}. \qquad 81$$

Здесь z и A соответственно равны:

a) для круглого сечения

$$A = d;\ z = 2{,}5, \qquad 82$$

b) для полого круглого сечения

$$A = d_1;\ z = 2{,}5\left(\frac{m^2-1}{m^2}\right), \qquad 83$$

где

$$m = \frac{d_1}{d_2}, \qquad 84$$

c) для прямоугольного сечения

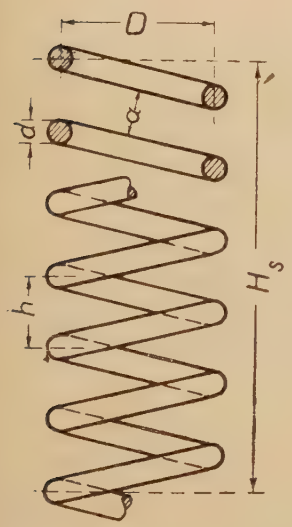
$$A = b;\ z = 2\left(\frac{x+1}{x^2}\right), \qquad 85$$

где

$$x = \frac{b}{\delta}, \qquad 86$$

d) для квадратного сечения

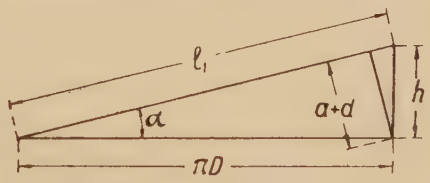
$$A = b;\ z = 4. \qquad 87$$



Фиг. 122.

Для металлических сопротивлений, выполненных из круглой проволоки или из ленты, коэффициент теплоотдачи по данным Нитхаммера (Niethammer) составляет от $\frac{1}{100}$ до $\frac{1}{500}\ \frac{Watt}{cm^2 \cdot {}^\circ C}$.

Металлические проволочные или ленточные сопротивления очень часто выпол-



Фиг. 123.

няются в виде свободно подвешенных спиралей.

Если из круглой проволоки сделана цилиндрическая спираль (см. фиг. 122), то общая длина проволоки всей спирали равняется:

$$L = n \cdot l_1,$$

где n — число витков, l_1 — длина одного витка спирали.

Из рассмотрения фиг. 123 следует, что

$$h = \pi D \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$a + d = h \cos \alpha = \pi D \cdot \sin \alpha,$$

$$l_1 = \frac{\pi D}{\cos \alpha} = \frac{h}{\sin \alpha}.$$

При прохождении по этой спирали тока силою I поглощается мощность, равная

$$P = I^2 \cdot r = I^2 \cdot \rho \cdot \frac{l_1 n}{s} = I^2 \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{s \cdot \cos \alpha}, \qquad 88$$

Пусть шаг спирали h равен

$$h = k_1 \cdot d,$$

а высота спирали обозначена посредством H_s.
Тогда полная поверхность всей проволоки спирали может быть определена по формуле:

$$S = \pi d \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{\cos \alpha} = \frac{\pi^2 \cdot d}{\cos \alpha} \cdot D \cdot \frac{H_s}{k_1 d} = \frac{\pi}{\cos \alpha \cdot k_1} \cdot \pi \cdot D \cdot H_s = Const\, \pi \cdot D \cdot H_s.$$

Последняя формула показывает, что полная охлаждающая поверхность свободно расположенной спирали из круглой проволоки не зависит от диаметра проволоки, причем эта поверхность прямо пропорциональна огибающей цилиндрической поверхности спирали.

Таким образом для случая продолжительной нагрузки, уравнение теплового равновесия может быть выражено следующим образом:

$$I^2 \cdot r = \pi \cdot D \cdot H_s \cdot o' \cdot \tau,$$

где o' — коэффициент теплоотдачи, зависящий не только от условий охлаждения, но также и от конструкции самой спирали.

Спирали, сделанные из круглой проволоки диаметром в $2 \div 3$ *mm* имеют следующие размеры (см. таблицу 24).

Таблица 24.

Размеры спиралей из проволоки диам. = 2 ÷ 3 mm.

Диаметр спирали в *mm*	Шаг витков
6	1 ÷ 1,5 *cm*
12	$1^1/_2$ витка на *cm*
18	2 витка на *cm*
30	двойной диаметр проволоки.

Пользуясь последней формулой и ранее приведенными, легко получить следующее равенство:

$$P = I^2 \cdot r = o' \cdot S \cdot \tau = o' \cdot \pi \cdot D \cdot H_s \cdot \tau = o' \cdot \pi \cdot D \cdot h \cdot n \cdot \tau = I^2 \cdot \rho \frac{\pi \cdot D \cdot n}{s \cos \alpha}, \quad . \quad . \quad 89$$

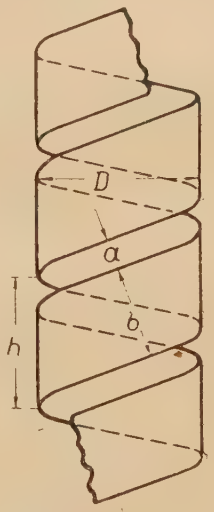
отсюда следует, что

$$\frac{I^2 \rho}{o' \cdot \tau} = s \cdot h \cos \alpha = s\,(a + d),$$

$$I = \sqrt{\frac{o' \cdot \tau}{\rho} \cdot s\,(a + d)}. \qquad 90$$

Последняя формула пригодна для расчета и в том случае, когда спираль выполнена из тонкой ленты; здесь только необходимо вместо диаметра d взять ширину ленты b (см. фиг. 124).

Ход расчета спиральных сопротивлений легче всего уяснить на примере.



Фиг. 124.

Пример. Пусть требуется определить основные размеры сопротивления, выполненного из круглой константановой проволоки $\left(\rho = 0{,}5\ \frac{\Omega\, mm^2}{m}\right)$ в виде свободно подвешенной цилиндрической спирали; сила тока $I = 25\ A$, повышение температуры $\tau = 225^\circ\ C.$, коэффициент теплоотдачи $o' = 10 \cdot 10^{-4}\ \frac{W}{cm^2\,^\circ C}$.

На основании формулы

$$\frac{I^2 \rho}{o' \cdot \tau} = s\,(a + d)$$

находят

$$s\,(a + d) = \frac{\pi d^2}{4}(a + d) = \frac{25^2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^{-4} \cdot 225} = 0{,}139.$$

Если принять, что

$$a = 2d,$$

то получается

$$d = \sqrt[3]{\frac{25^2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 4}{10 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot 3 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{0{,}059} = 0{,}3893\ cm.$$

Ближайшим стандартным размером круглой проволоки является диаметр в $0{,}4\ cm$. Для спирали, выполненной из проволоки этого диаметра, допустимая сила тока может быть

$$I = \sqrt{\frac{o' \cdot \tau}{\rho}\, s\,(a + d)} = \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-4} \cdot 225 \cdot \pi \cdot 0{,}4^2 (0{,}8 + 0{,}4)}{0{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 4}} = \sqrt{679} \cong 26\ A.$$

Обычно диаметр спирали делается равным

$$D = (6 \div 10)\, d.$$

Пусть

$$D = 3{,}0\ cm.$$

Из формулы

$$a + d = \pi D \sin\alpha = h \cos\alpha$$

находятся

$$\sin\alpha = \frac{a+d}{\pi D} = \frac{0{,}8 + 0{,}4}{\pi \cdot 3} = 0{,}1273$$

и

$$\cos\alpha = \sqrt{1 - \sin^2\alpha} = \sqrt{1 - 0{,}162} = 0{,}915.$$

Шаг спирали

$$h = \frac{a+d}{\cos\alpha} = \frac{0{,}8 + 0{,}4}{0{,}915} = 1{,}31\ cm.$$

Длина витка

$$l_1 = \frac{\pi D}{\cos\alpha} = \frac{\pi \cdot 3}{0{,}915} = 10{,}3\ cm.$$

Сопротивление одного витка

$$r_1 = \frac{\rho \cdot l_1}{s} = \frac{0{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 10{,}3 \cdot 4}{\pi \cdot 0{,}4^2} = 4{,}1 \cdot 10^{-3}\ \Omega.$$

Поглощаемая мощность в одном витке

$$P_1 = I^2 \cdot r_1 = 26^2 \cdot 4{,}1 \cdot 10^{-3} = 2{,}77\ W.$$

Вес материала одного витка

$$G_1 = V \cdot \gamma = l_1 \cdot s \cdot \gamma = 10{,}3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0{,}4^2 \cdot 8{,}8 = 11{,}4\ g$$

$$\left(\text{принято } \gamma = 8{,}8\ \frac{g}{cm^3}\right).$$

Постоянная времени нагрева

$$T = \frac{q \cdot G}{\sigma' \cdot S} = \frac{q \cdot \gamma \cdot l_1 \cdot s \cdot n}{\sigma' \cdot \pi D h \cos\alpha \cdot n} = \frac{q \cdot \gamma \cdot \pi D \frac{\pi}{4} d^2}{\sigma \cdot \pi D h \cos\alpha}$$

или после сокращения

$$T = \frac{q \cdot \gamma \cdot \pi\, d}{4 \cdot \sigma' \left(1 + \frac{a}{d}\right)}.$$

Приняв

$$q = 0{,}43\ \frac{Joule}{^\circ C \cdot g},$$

находят

$$T = \frac{0{,}43 \cdot 88\, \pi \cdot 0{,}4}{4 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 2)} = 396\ sec = 6{,}6\ min.$$

Если положить, что данное сопротивление подвергается нагреву током в течение, например 20 *sec*, то коэффициент перегрузки для мощности составляет приблизительно

$$p \cong \frac{T}{t} = \frac{396}{20} = 19{,}8,$$

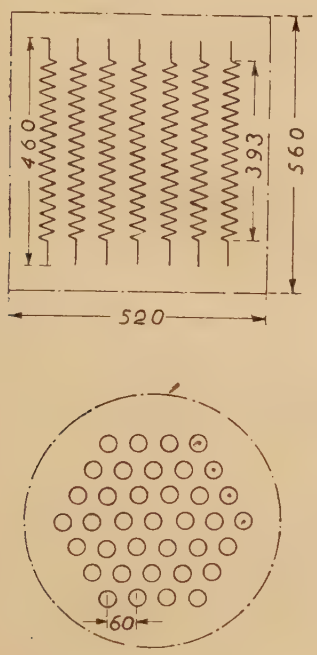
а для тока

$$p_1 = \sqrt{p} = \sqrt{19{,}8} = 4{,}45.$$

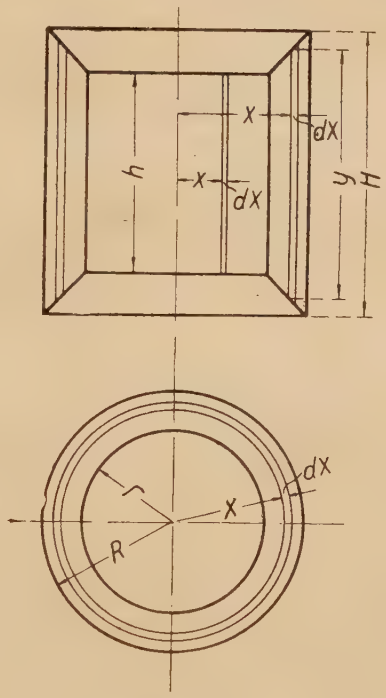
Отсюда следует, что повышение температуры сопротивления достигнет 225° C при прохождении в течение 20 *sec* силы тока, равной

$$I_1 = \sqrt{p}\, I = p_1\, I = 26 \cdot 4{,}45 = 115{,}8\ A.$$

§ 35. Нагрев реостатов с заполнением. — Процесс нагрева реостата, спирали которого помещаются в кожухе, заполненном какой-либо охлаждающей и не проводящей тока массой с большой теплоемкостью (масло, песок, цемент, азбест и т. п.), значительно отличается



Фиг. 125.



Фиг. 126.

от процесса нагрева того же реостата, но с воздушным охлаждением в котором спирали подвешены на рамах и свободно омываются воздухом.

Исследование нагрева реостата с элементами сопротивлений, погруженными в теплоемкую массу, удобнее всего вести на частном случае, рассматривая конструкцию реостата с вертикально расположенными спиралями, изображенную на фиг. 125, где указано относительное расположение спиралей между собой в пространстве, занятом теплоемкой массой.

За поверхность охлаждения такого реостата приходится считать только боковые поверхности кожуха, так как кожух не целиком

заполняется теплоемкой массой, а между ней и верхней горизонтальной плоскостью кожуха остается слой воздуха, обладающий весьма малой теплопроводностью.

Чтобы получить возможность судить о значении допустимого нагрева, необходимо рассмотреть вопрос о распределении тепла в теле реостата. Для этой цели удобнее всего идеализировать тело реостата и представить его в виде цилиндра, как это изображено на фиг. 126. В каждом элементе объема этого цилиндра за единицу времени возникает постоянное количество тепла, равное $P_1 \frac{Watt}{cm^3}$. Если из тела реостата выделить некоторый элементарный цилиндр с внутренним радиусом x (причем должно быть $x < r$) и толщиною стенки dx, то, считая, что тепловой поток распространяется только в радиальных направлениях, количество тепла протекающего через данный элементарный цилиндр в единицу времени составляет

$$-2\lambda\pi x h \frac{d\tau}{dx}.$$

При установившемся тепловом состоянии тела, это количество тепла должно быть равно количеству тепла, возникающему во внутреннем цилиндре радиуса x, и которое равно $P_1\pi x^2 h$. Приравнивая эти выражения друг другу и сокращая на $\pi x h$, получают:

$$P_1 x + \lambda 2 \frac{d\tau}{dx} = 0. \qquad 91$$

Это уравнение легко разрешается, причем для определения постоянной интегрирования вводят условие, что при $x = r$ должно быть $\tau = \tau_1$. В результате получают:

$$\tau = \tau_1 + \frac{P_1}{4\lambda}(r^2 - x^2). \qquad 92$$

Наивысшее повышение температуры имеет место в середине цилиндра ($x = 0$), и его значение равняется:

$$\tau_{max} = \tau_1 + \frac{P_1}{4\lambda} r^2. \qquad 92\text{ a}$$

Значение среднего повышения температуры определяется из уравнения:

$$\tau_{cp} \cdot r^2 \pi = \int_0^r \tau . 2\pi x . dx, \qquad 93$$

откуда, после подстановки вместо τ его выражения из уравнения 92, получают:

$$\tau_{cp} = \tau_1 + \frac{P_1}{8\lambda} r^2 \qquad 93\text{ a}$$

и

$$\tau_{cp} = \frac{1}{2}(\tau_{max} + \tau_1), \qquad 94$$

или также

$$\tau_{cp} - \tau_1 = \frac{1}{2}(\tau_{max} - \tau_1), \qquad 94\text{ a}$$

т. е. среднее повышение температуры представляет из себя среднее арифметическое из значений повышения температуры в наиболее нагретом месте и на окружности цилиндра радиуса r.

Во внешней части цилиндра, а именно при значениях $x > r$, никакого выделения тепла не происходит, поэтому мощность теплового потока для каждого элементарного цилиндра здесь остается постоянной, и значение ее может быть обозначено через P. Далее предполагается, что тепловой поток от выделяющего тепло цилиндра, высотою h, распространяется постепенно в радиальном направлении и достигает отводящей тепло в окружающую среду наружной поверхности цилиндра высотою H, и что изменение высоты цилиндров с увеличением радиусов их происходит по линейному закону. На основании этого получают следующее дифференциальное уравнение:

$$P + \lambda \cdot 2\pi x \cdot y \frac{d\tau}{dx} = 0 \qquad 95$$

причем, как это легко понять из фиг. 126, значение y определяется из уравнения:

$$\frac{y - h}{H - h} = \frac{x - r}{R - r}. \qquad 96$$

Интегрирование уравнения 95 при условии, что при $x = R$ должно быть $\tau = \tau_a$, дает после некоторых преобразований следующее выражение для повышения температуры:

$$\tau = \tau_a + \frac{P}{\lambda 2\pi h} \cdot \frac{1 - \frac{r}{R}}{1 - \frac{Hr}{hR}} \ln \frac{Rh}{xH} \left[1 + \left(\frac{H}{h} - 1\right) \frac{x - r}{R - r}\right]. \qquad 97$$

Из последней формулы, принимая $x = r$, можно получить опять значение повышения температуры τ_1 на поверхности внутреннего цилиндра, а именно:

$$\tau_1 = \tau_a + \frac{P}{\lambda 2\pi h} \cdot \frac{1 - \frac{r}{R}}{1 - \frac{Hr}{hR}} \ln \frac{Rh}{rH} = \tau_a + \frac{P \cdot a}{\lambda 2\pi h} \qquad 97\text{ a}$$

где α есть числовой коэффициент, зависящий только от линейных размеров реостата. Мощность теплового потока, отдаваемая внутренним цилиндром, равна общему количеству тепла, возникающему в нем в единицу времени, и определяется по формуле:

$$P = P_1 \cdot \pi r^2 \cdot h. \qquad 98$$

Так как все это тепло отводится в окружающую среду с внешней поверхности кожуха, то можно написать, что

$$P = o \cdot S \cdot \tau_a = o \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H \cdot \tau_a. \qquad 99$$

Теперь, исключая из уравнений 93 а, 97 а и 99 значения τ_a и τ_1 и заменяя в уравнении 93 а P_1 посредством P, получают:

$$P = o \cdot 2\pi R \cdot H \left[\tau_{cp} - \frac{P}{8\pi h\lambda} = \frac{P\alpha}{2\pi h\lambda} \right].$$

Решая это последнее уравнение относительно P, находят:

$$P = \frac{o \cdot 2\pi RH \cdot \tau_{cp}}{1 + (1 + 4\alpha)\dfrac{o \cdot RH}{4\lambda h}}. \qquad 100$$

В числителе этого последнего уравнения стоит то же выражение, что и в уравнении 99, только здесь значение повышения температуры на внешней поверхности кожуха заменено средним значением повышения температуры внутреннего цилиндра. Знаменатель уравнения 100 представляет отношение значений этих двух вышеупомянутых повышений температуры.

Пример. На фиг. 125 схематически изображен реостат с песочным охлаждением и даны его основные размеры. Спирали этого реостата рассчитаны в предыдущем примере и состоят каждая из $n = 30$ витков. Тогда длина спирали составляет $n \cdot h_1 = 1{,}31 \cdot 30 = 39{,}3$ *см*. Таких спиралей всего имеется $N = 37$, и они расположены вертикально на расстоянии 6 *см* друг от друга. Все спирали соединены последовательно, и таким образом общее сопротивление всего реостата равно:

$$R = 37 \cdot 30 \cdot 4{,}1 \cdot 10^{-3} = 4{,}55\,\Omega.$$

При этом линейные размеры реостата получаются:

$$r = 18 \text{ см}; \quad R = 26 \text{ см}; \quad h = 46 \text{ см}; \quad H = 56 \text{ см}.$$

Отсюда определяется коэффициент α:

$$\alpha = \frac{1-\frac{r}{R}}{1-\frac{Hr}{hR}} \ln \frac{Rh}{rH} = \frac{1-\frac{18}{26}}{1-\frac{56\cdot 18}{46\cdot 26}} \ln \frac{26\cdot 46}{18\cdot 56} = 1{,}95 \ln 1{,}19 = 0{,}332.$$

Принимая теплопроводность песка равной

$$\lambda = 31\cdot 10^{-4} \frac{Watt}{cm\ ^\circ C},$$

находят знаменатель уравнения 100:

$$1+(1+4\alpha)\frac{o\cdot R\cdot H}{4\lambda h} = 1+(1+4\cdot 0{,}332)\cdot \frac{10\cdot 10^{-4}\cdot 26\cdot 56}{4\cdot 31\cdot 10^{-4}\cdot 46} = 6{,}94.$$

При среднем повышении температуры $\tau_{cp} = 225^\circ\ C$, допустимая мощность равняется:

$$P = \frac{o\cdot 2\pi\cdot R\cdot H\cdot \tau_{cp}}{1+(1+4\alpha)\frac{o\cdot R\cdot H}{4\lambda h}} = \frac{10\cdot 10^{-4}\cdot 2\cdot \pi\cdot 26\cdot 56\cdot 225}{6{,}94} = 297\ \ Watt,$$

откуда, зная сопротивление всего реостата, находят допустимую силу тока

$$I = \sqrt{\frac{297}{4{,}55}} = 8{,}08\ \ A,$$

которая равна всего около трети от силы тока, вызывающего то же повышение температуры в случае спиралей, охлаждаемых воздухом.

Повышение температуры на наружной поверхности кожуха реостата можно вычислить, пользуясь уравнением 99, однако, это можно сделать проще, зная, что знаменатель уравнения 100 представляет собою отношение τ_{cp} к τ_a. Тогда

$$\tau_a = \frac{225}{6{,}94} = 32{,}5^\circ\ C.$$

Чтобы определить повышение температуры в наиболее нагретом месте реостата, из уравнений 92 а, 93 а и 98 находят сначала разность повышений температуры

$$\tau_{max} - \tau_{cp} = \frac{\rho_1\cdot r^2}{8\lambda} = \frac{P}{8\pi h\lambda} = \frac{297\cdot 10^4}{8\pi\cdot 46\cdot 31} = 83^\circ\ \ C,$$

т. е. температура наиболее нагретого места реостата (середина) превышает температуру окружающего его воздуха на

$$\tau_{max} = 225 + 83 = 308^\circ\ \ C.$$

До сих пор расчет нагрева реостата производился для случая продолжительной нагрузки, при кратковременной же нагрузке процесс нагрева происходит иначе. Насколько сильно можно нагрузить реостат, если учитывать теплоемкость только одного металла, было подсчитано в предыдущем примере. В этом случае при продолжительности действия нагрузки, равной 20 *sec*, сила нагрузочного тока составляла 115,8 *A*. Однако за период нагрузки часть возникающего при этом тепла отдавалась окружающей среде, и теперь дальнейшей задачей является выяснение того, каким образом можно учесть это обстоятельство. Если ввести некоторую новую величину, а именно, плотность теплового потока P_s, которая означает количество тепла, протекающего в единицу времени через единицу поверхности данной среды, и выражается в $\frac{Watt}{cm^2}$, то общий тепловой поток, отходящий от внешней поверхности всех спиралей реостата, равен

$$P_2 = P_s \cdot \pi d \cdot l_1 \cdot n \cdot N,$$

причем значение P_s определяется по формуле Яссе:

$$P_s = \frac{\tau}{2}\sqrt{\frac{\pi q \lambda}{t}}.$$

Подставляя в эту формулу значения:

$$\tau = 225\,^\circ C;\ t = 20\,sec;\ q \cdot \gamma = 2{,}0\,\frac{Watt}{cm^3\,^\circ C}$$

и $\lambda = 31 \cdot 10^{-4}\,\frac{Watt}{cm\,^\circ C}$, получают значение плотности теплового потока в слое песка, прилегающем непосредственно к проволокам спиралей реостата

$$P_s = \frac{225}{2}\sqrt{\frac{\pi \cdot 2 \cdot 31}{20 \cdot 10^4}} = 3{,}9\,\frac{Watt}{cm^2}.$$

Теперь тепловая мощность, поглощаемая заполняющей реостат массой, равна

$$P_2 = P_s \cdot \pi d \cdot l_1 \cdot n \cdot N = 3{,}9 \cdot \pi \cdot 0{,}4 \cdot 10{,}3 \cdot 30 \cdot 37 = 56\,100\ Watt.$$

Для определения общей мощности, поглощаемой всем реостатом, сюда надо прибавить мощность, поглощаемую самими проволоками спиралей вследствие их теплоемкости, и которая равна

$$P_1 = q \cdot g_1 \cdot n \cdot N \cdot \frac{\tau}{t} = 0{,}43 \cdot 11{,}4 \cdot 30 \cdot 37\,\frac{225}{20} = 61\,200\ Watt.$$

Это та же самая мощность, которую поглощают спирали, подвешенные свободно в воздухе, т. е. $I_1^2 \cdot R = 115{,}8^2,\ 4{,}55 = 61\,200$ *Watt*. Отсюда видно, что, помещая спирали в массу с большой теплоемкостью, нагрузку проводов можно увеличить вдвое, при этом значение допускаемой силы тока равно

$$I = \sqrt{\frac{P_1 + P_2}{R}} = \sqrt{\frac{56100 + 61200}{4.55}} = 160{,}6A.$$

Из полученных результатов следует, что реостаты с песочным охлаждением очень выгодно применять для поглощения большого количества тепла при кратковременной нагрузке, тогда как при продолжительном включении их приходится допускать значительно меньшую нагрузку, чем при воздушном охлаждении. Чтобы получить то же повышение температуры такого реостата, нагрузку приходится соответствующим образом уменьшать; это объясняется тем, что тепловому потоку приходится проходить длинный путь по заполняющей реостат массе, прежде чем он сможет отводиться окружающим реостат воздухом.

Этот же реостат может быть выполнен несколько иной конструкции, а именно: каждая спираль помещается в отдельный цилиндр, наполненный песком, причем наружные поверхности всех этих цилиндров свободно омываются воздухом. Пусть диаметр этих цилиндров равен 5 *cm*, так что между стенкой цилиндра и спиралью имеется слой песка толщиною 1 *cm*. Внутри спиралей повышение температуры равно таковому же самих спиралей, так как тепловой поток от нагретых спиралей распространяется радиально в направлении стенок цилиндров. По отношению к внешнему слою песка, окружающего спирали, можно, принимая ради простоты $H = h$, на основании уравнений 99 и 97а написать, что

$$P = \frac{o \cdot 2\pi R \cdot h \cdot \tau_1}{1 + a\frac{o \cdot R}{\lambda}}.$$

Зная, что теперь $r = 1{,}5$ *cm*, $R = 2{,}5$ *cm* и $H = h = 46$ *cm*, находят сначала коэффициент a:

$$a = \ln\frac{R}{r} = \ln\frac{2{,}5}{1{,}5} = 0{,}51,$$

а потом знаменатель последнего выражения:

$$1 + a\frac{oR}{\lambda} = 1 + 0{,}51\,\frac{10 \cdot 10^{-5} \cdot 2{,}}{31 \cdot 10^{-4}} = 1{,}412.$$

Принимая за повышение температуры спирали $\tau_1 = 225°C$, находят допустимую мощность, поглощаемую одной спиралью.

$$P = \frac{\sigma \cdot 2\pi \cdot R \cdot h \cdot \tau_1}{1 + \alpha \frac{\sigma R}{\lambda}} = \frac{10 \cdot 10^{-4} \cdot 2\pi \cdot 2{,}5 \cdot 46 \cdot 225}{1{,}412} = 115 \ Watt.$$

Мощность, поглощаемая теперь всеми 37 спиралями, составляет $115 \cdot 37 = 4\,255$ *Watt*, тогда как ранее было только 297 *Watt*. Допускаемая сила тока в данном случае равна:

$$I = \sqrt{\frac{4255}{4{,}55}} = \sqrt{936} = 30{,}6A.$$

Отсюда следует, что при очень тонком слое заполняющая масса весьма благоприятно влияет на нагрев проводов, так как в последнем случае при одном и том же повышении температуры сила нагрузочного тока может быть допущена выше, чем при свободно подвешенных спиралях.

Повышение температуры наружных поверхностей цилиндров равно

$$\tau_a = \frac{225}{1{,}42} = 159° C.$$

Чтобы определить теплоемкость такого цилиндра, находят сначала объем внешней части цилиндра, заполненной песком, который равен

$$V = \pi (R^2 - r^2) h = \pi (2{,}5^2 - 1{,}5^2) 46 = 579 \ cm^3.$$

За повышение температуры приближенно принимают среднее арифметическое значение, т. е.

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_1 + \tau_a) = \frac{1}{2}(225 + 159) = 192 \, °C.$$

[При точных расчетах среднее повышение температуры следует вычислять по уравнению 93 для пределов r и R, причем значение τ определяется из уравнения 97, если принять $H = h$. Однако разница между результатами обоих подсчетов составляет всего несколько процентов.] Если положить, что удельная теплоемкость сухого песка равна $q \cdot \gamma = 2{,}0 \frac{Joule}{cm^3 \, °C}$, то общая теплоемкость внешней части цилиндра определяется по формуле:

$$Q_1 = q \cdot \gamma \cdot V_1 \cdot \tau = 2{,}0 \cdot 579 \cdot 192 = 222\,000 \ Joule.$$

Для внутренней части цилиндра, повышение температуры которой во всех местах постоянно и равно $\tau = 225°C$, теплоемкость подсчитывается по той же формуле

$$Q_2 = q \cdot \gamma \cdot V_2 \cdot \tau = 2 \cdot \pi \cdot 1{,}5^2 \cdot 46 \cdot 225 = 146\,100 \ Joule.$$

Остается подсчитать теплоемкость самой спирали, объем которой равен $V_3 = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \pi \cdot D \cdot n = \frac{\pi}{4} 0{,}4^2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 30 = 35{,}5\ cm^3$, т. е. $Q_3 = q \cdot \gamma\ V_3 \cdot \tau = 0{,}43 \cdot 8{,}8 \cdot 35{,}5 \cdot 225 = 30\,200$. Общая теплоемкость всего цилиндра равна сумме этих теплоемкостей, т. е.

$$Q = 222\,000 + 146\,100 + 30\,200 = 398\,300\ Joule.$$

Так как согласно прежних вычислений мощность, поглощаемая одной спиралью, составляет 115 *Watt*, то на основании формулы $\frac{\tau_m}{T} = \frac{P}{G \cdot q}$ (см. стр. 104) легко определить и постоянную времени нагрева для всего тела отдельного элемента (спирали и песка)

$$T = \frac{Q}{P} = \frac{398300}{115} = 3460\ sec = 57{,}7\ min.$$

Однако этим значением T при кратковременной нагрузке следует пользоваться с осторожностью по следующим причинам. За период нагрузки в проволоке возникает такое количество тепла, что она нагревается значительно сильнее, чем заполняющая масса. Эта разность температур за время покоя стремится уменьшиться и исчезнуть совсем, однако, полностью это не всегда достигается, и чем меньше период нагрузки по сравнению с периодом покоя, тем сильнее сказывается это различие. Таким образом истинное повышение температуры проводников тем больше превосходит расчетное, чем короче период нагрузки. Это явление можно объяснить, считая, что проводник сам по себе имеет меньшую постоянную времени. Для периода нагрузки $t_a = 20\ sec$, ранее была найдена сила тока $160{,}6A$, а так как при продолжительной нагрузке сила тока равнялась $30{,}6A$, то коэффициент перегрузки равен

$$p = \frac{160{,}6^2}{30{,}6^2} = 27{,}6;$$

отсюда находится и постоянная времени нагрева для элементов сопротивления (только одной спирали):

$$T = p \cdot \tau_a = 27{,}6 \cdot 20 = 552\ sec = 9{,}2\ min.$$

Поэтому при проектировании реостатов для прерывистой нагрузки всегда необходимо обращать внимание на то, чтобы максимальная нагрузка, на которую рассчитывается реостат, не превосходила той, которая определяется теплоемкостью элементов сопротивления и окружающих их слоев массы для заданного повышения температуры.

*

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ПЛАВНЫЙ ПУСК В ХОД ДВИГАТЕЛЕЙ

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ПЛАВНЫЙ ПУСК В ХОД ДВИГАТЕЛЕЙ

*

§ 36. Электрический процесс пуска. — Основное назначение пускового реостата заключается или в ограничении силы тока при пуске двигателя в ход, или в изменении пускового тока по наперед заданному закону с целью осуществления определенных пусковых условий в механическом отношении. Необходимость ограничения силы пускового тока вызывается, с одной стороны, механическими явлениями, имеющими место при ускорении вращения, с другой — электрическими, как то: падением напряжения в сети, условиями коммутации, в случае применения коллекторных двигателей, нагреванием самого двигателя и, наконец, влиянием чрезмерных толчков тока в сети и в цепи измерительных приборов.

При плавном пуске, каковой имеет место при применении жидкостных реостатов или металлических — с очень большим числом ступеней, пуск двигателя в ход происходит при силе тока, не превышающей желаемого предельного значения, тогда как при грубоступенчатых пусковых реостатах сила тока достигает своего предельного значения при переходе контакта с одной ступени на другую.

Во время пуска в ход сила тока контролируется по амперметру, показания которого в течение времени пуска должны оставаться или постоянными, или изменяться согласно заданным условиям пуска в ход.

Так как плавный пуск в ход асинхронных двигателей ничем существенно не отличается от плавного пуска в ход шунтовых и сериесных двигателей постоянного тока, то ход расчета пускового реостата в обоих случаях остается один и тот же, поэтому ниже рассматривается пуск в ход только двигателя постоянного тока.

Если обозначить посредством Φ поток якоря от одного полюса и через I силу тока в цепи якоря, то крутящий момент двигателя равняется

$$D = K \cdot I \cdot \Phi, \qquad 101$$

где K — постоянная, зависящая от устройства обмотки якоря.

Вторым основным уравнением является выражение для электродвижущей силы якоря двигателя

$$E = K \cdot \omega \cdot \Phi, \qquad 102$$

где ω — угловая скорость вращения якоря.

Если разделить уравнение 101 на 102, то при сохранении тех же обозначений получается:

$$E \cdot I = D \cdot \omega, \qquad 103$$

т. е. развиваемая якорем электромагнитная мощность равна механической мощности, состоящей из развиваемой на валу двигателя полезной механической мощности и потерь на трение о воздух, в подшипниках и т. п.

В шунтовых двигателях можно с достаточным приближением считать, что магнитный поток не изменяется от силы тока в якоре, что имеет место, когда двигатель снабжен дополнительными полюсами, поэтому, если пусковой ток за все время пуска остается постоянным, то крутящий момент двигателя тоже остается постоянным, и электродвижущая сила, согласно уравнению 102, зависит исключительно от угловой скорости вращения якоря.

В сериесных двигателях обмотка возбуждения питается якорным током и, следовательно, поток полюсов изменяется с изменением силы тока, протекающего по якорю двигателя. Однако при постоянной силе пускового тока все сказанное относительно шунтовых двигателей имеет место и в сериесных.

Обозначая посредством E и I эффективные значения фазовой электродвижущей силы и силы тока ротора асинхронного двигателя, можно считать, что уравнения 101 и 103 остаются в силе и для этого вида двигателей, если ввести коэффициент 3 (в случае трехфазного тока), т. е.

$$D = 3K \cdot I \cdot \Phi \qquad 101\text{ а}$$

и соответственно

$$3E \cdot I = D \cdot \omega. \qquad 103\text{ а}$$

Третье основное уравнение, которым приходится пользоваться при расчете реостатов для двигателей постоянного тока, устанавливает связь между напряжением на зажимах E_k и противодействующей электродвижущей силой E в виде

$$E_k = E + I \cdot R, \qquad 104$$

где R — сопротивление цепи якоря, включающее в себя сопротивления: собственно обмотки якоря, контакта щеток, обмоток дополнительных

полюсов и компенсационной обмотки, если таковая имеется; в случае сериес-двигателей сюда включается еще сопротивление обмотки главных полюсов.

Что касается подобной зависимости для двигателей переменного тока, то таковая представляется следующим математическим выражением:

$$\dot{E}_k = \dot{E} + I\dot{Z}.$$

Так как уравнение 104 должно сохранять свою силу при всех обстоятельствах, то оно для постоянной силы тока I и постоянного напряжения на зажимах E_k дает непосредственно зависимость между сопротивлением и электродвижущей силой и, на основании уравнения 102, угловой скоростью вращения якоря. По мере уменьшения сопротивления пускового реостата скорость вращения якоря возрастает и достигает своего номинального значения при сопротивлении цепи якоря, равном внутреннему сопротивлению двигателя. В идеальном случае, когда внутреннее сопротивление цепи якоря равно нулю, скорость вращения двигателя достигает максимума. Пусть в этом случае скорость вращения равна ω_s, тогда из уравнения 102 следует:

$$E_k = K \cdot \omega_s \cdot \Phi. \qquad 102\,a$$

Уравнение 104 показывает, что при постоянном сопротивлении якорной обмотки и при спадении силы тока до нуля напряжение на зажимах равно электродвижущей силе. Для шунтовых двигателей и асинхронных это является границей между рабочими процессами двигателя и генератора, т. е. значение угловой скорости вращения, равное ω_s, является предельным; эта скорость называется синхронной скоростью вращения двигателей. Для случая сериесных двигателей последнее рассуждение не применимо, так как здесь поток полюсов зависит от силы тока якоря и при уменьшении последней поток и электродвижущая сила двигателя также уменьшаются. Вследствие этого сила тока опять повышается, и таким образом каждой угловой скорости вращения соответствует определенная сила тока, которая при бесконечно большой угловой скорости должна исчезнуть совсем. Таким образом при расчете пускового реостата для сериесных двигателей приходится принимать во внимание угловую скорость вращения, соответствующую номинальной силе тока.

Дальнейшим важным пунктом, из условий которого представляется возможным определить значение начального пускового сопротивления, является уравнение 104, написанное для случая неподвижного двигателя, т. е.

$$E_k = I \cdot R_1, \qquad 104\,a$$

где R_1 — начальное пусковое сопротивление.

Теперь при помощи уравнений 104 и 104 а имеется возможность получить зависимость между сопротивлением якорной цепи и угловой скоростью вращения.

От деления уравнения 104 на 104 а получается

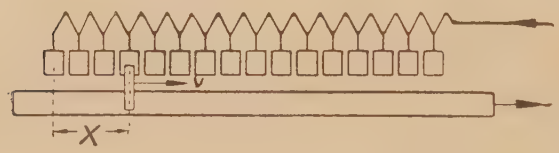
$$\frac{R}{R_1} = 1 - \frac{E}{E_k}, \qquad 105$$

или, если принять во внимание уравнения 102 и 102 а,

$$\frac{R}{R_1} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s}, \qquad 105\text{ а}$$

т. е. угловая скорость вращения представляет собою некоторую линейную функцию сопротивления пусковой цепи якоря.

Идеальный случай плавного пуска возможно осуществить при применении жидкостных реостатов с постепенным уменьшением площади поверхностей электродов посредством перемещения самих электродов или уровня рабочей жидкости (электролита) при неподвижных электродах. Металлические же пусковые реостаты для плавного пуска в ход двигателей выполняются с большим числом ступеней, причем отдельные элементы сопротивления приключаются к контактам, расположенным либо по кругу, либо по прямой линии, как это изображено схематически на фиг. 127. Однако в настоящей главе разбирается идеальный случай металлического реостата с бесконечно большим числом ступеней, состоящих из весьма малых равных сопротивлений. По контактам такого реостата заставляют скользить ползушку, соединенную электрически с шиной, отводящей ток обратно в сеть. Скользящий контакт обычно насаживается на винт, приводимый во вращение либо от руки, либо посредством электромотора. Скорость, с которой должен перемещаться скользящий контакт, выбирается в зависимости от устройства и величины сопротивлений отдельных ступеней; эта скорость берется обычно постоянной.



Фиг. 127.

Если обозначить скорость перемещения скользящего контакта посредством v и время, протекшее с момента начала пуска в ход, посредством t, то путь, пройденный контактом, равняется

$$x = v \cdot t.$$

Так как этот путь пропорционален времени ($v = Const$), то достаточно знать зависимость сопротивления от времени, чтобы найти закон деления сопротивления по ступеням.

§ 37. Разбег и его продолжительность. — Ранее была выяснена зависимость сопротивления от угловой скорости вращения двигателя (уравнение 105 а), но для расчета реостата необходимо еще знать зависимость угловой скорости и положения передвижного контакта от времени. Для выяснения этих зависимостей нужно взять дифференциальное уравнение, выражающее процесс ускорения вращения двигателя и сцепленных с ним вращающихся и движущихся масс. Электрическая энергия, подводимая к якорю двигателя, превращается в механическую, выражаемую крутящим моментом D на валу двигателя, и угловой скоростью ω (см. уравн. 103). Этот крутящий момент, развиваемый двигателем в период ускорения, можно представить как сумму нагрузочного момента M (включающего в себя потери на трение в подшипниках и о воздух) и динамического, или ускоряющего, служащего для ускорения движения масс якоря двигателя и сцепленных с ним вращающихся и движущихся частей. Если обозначить посредством ω угловую скорость вращения якоря двигателя и посредством θ общий момент инерции всей подвижной системы двигателя, приведенной к оси двигателя, то

$$\theta \frac{d\omega}{dt} = D - M. \qquad 106$$

Общий момент инерции может быть определен на основании следующих соображений: если θ_1, $\theta_2 \ldots$ — моменты инерции отдельных частей, сцепленных с двигателем, и ω_1, $\omega_2 \ldots$ — угловые скорости вращения их — с одной стороны, и с другой стороны — m_2, $m_2 \ldots$ — массы движущихся частей с соответствующими линейными скоростями v_1, $v_2 \ldots$, то сумма кинетических энергий всех этих частей, приведенная к оси двигателя, выражается таким образом:

$$\theta \frac{\omega^2}{2} = \sum \theta_\nu \frac{\omega^2_\nu}{2} + \sum m_\nu \frac{v_\nu^2}{2}$$

и при делении этого последнего уравнения на $\frac{\omega^2}{2}$ получают:

$$\theta = \sum \theta_\nu \left(\frac{\omega_\nu}{\omega}\right)^2 + \sum m_\nu \left(\frac{v_\nu}{\omega}\right)^2, \qquad 107$$

где выражения в скобках означают так называемые передаточные коэффициенты, служащие для приведения всех вращающихся и

движущихся масс к моменту инерции относительно оси двигателя. Величина Θ для данной установки является постоянной величиной.

При расчете пусковых реостатов играет весьма важную роль отношение $\frac{\Theta \cdot \omega_n}{D}$, где ω_n — номинальная скорость вращения двигателя. Эта величина, легко увидеть, имеет размерность времени и в дальнейшем обозначается посредством T_s; таким образом

$$T_s = \frac{\Theta \cdot \omega_n}{D} \qquad 108$$

При постоянном вращающем моменте, развиваемом двигателем во время пуска, величина T_s представляет собою постоянную величину и называется **постоянной времени пуска**.

После преобразования уравнения 108 выражение для T_s принимает вид:

$$T_s = \frac{\Theta \cdot \omega_n^2}{D \cdot \omega_n} = 2 \cdot \frac{A_n}{P_a}, \qquad 109$$

где A_n — кинетическая энергия движущихся масс при номинальной скорости вращения, а P_a — **максимальная пусковая мощность**. Мгновенное значение электромагнитной мощности во время пуска в ход двигателя выражается величиной $D \cdot \omega$, которая при постоянном моменте является пропорциональной угловой скорости вращения ω; при $\omega = \omega_n$ эта мощность достигает максимального значения P_a. Среднее значение электромагнитной мощности за период пуска представляется равным $^1/_2 P_a$. **Если на валу двигателя отсутствует полезный нагрузочный момент, т. е. $M = 0$, то весь момент, развивающийся на валу двигателя, нужно отнести к ускоряющему, и тогда период T_s представляет полное время разбега двигателя до номинальной скорости вращения.**

Нагрузочный момент в общем виде можно выразить посредством крутящего момента двигателя в виде:

$$M = \alpha D. \qquad 110$$

Если последнее соотношение подставить в уравнение 106 и принять во внимание уравнение 108, то

$$\frac{T_s}{\omega_n} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 1 - \alpha. \qquad 106\text{а}$$

Коэффициент α в частном случае может быть постоянной величиной, а в общем есть некоторая функция от скорости вращения ω.

На практике приходится различать три следующих важных случая:

1. Пуск в ход машин и аппаратов, требующих при своей работе главным образом постоянного момента, который лишь незначительно изменяется со скоростью вращения от сопротивления движущих. Сюда например относятся: подъемные машины, прокатные станы, тяговые двигатели и т. п. Кривую противодействующего момента в этом случае с достаточной точностью можно считать прямой линией, и в общем виде можно написать:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \frac{\omega}{\omega_n}. \qquad 111$$

2. Если от двигателя приводятся в движение машины, в свою очередь приводящие в движение большие количества воздуха или жидкости (вентиляторы, центробежные насосы, пропеллеры и т. д.), то в этом случае потребный крутящий момент можно считать пропорциональным квадрату угловой скорости вращения, т. е.

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2. \qquad 111\,b$$

3. Мощность, необходимая для приведения в движение машин, почти постоянна, $M \cdot \omega = Const$, что имеет место на практике в случае привода токарных и т. п. станков. Для этого случая коэффициент α можно выразить следующим образом:

$$\alpha = \alpha_0 + \frac{\alpha_3}{a + \omega}, \qquad 111\,c$$

где α_0, α_1, α_2, α_3 и a, некоторые постоянные, зависящие от момента покоя и моментов сопротивления.

Если величину α, выраженную предыдущими уравнениями, ввести в уравнение 106, то после простого интегрирования легко можно найти зависимость между ω и t.

В простейшем случае, когда $\alpha = Const$,

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \left(1 - \alpha\right)\frac{t}{T_s}, \qquad 112$$

т. е. в этом случае скорость двигателя находится в прямой зависимости от времени, протекшего с момента начала пуска. Отсюда следует, что сопротивление якорной цепи (см. также ур. 105 а) в зависимости от времени изменяется также прямолинейно.

Из уравнения 112 можно определить время пуска двигателя, которое отсчитывается от момента включения до выключения всего сопротивления реостата, т. е. до того момента, когда в цепи якоря остается лишь собственное сопротивление двигателя и соединительных

проводов. Однако в этот момент времени двигатель не достигает еще своей номинальной скорости ω_n, а вращается с некоторой меньшей скоростью ω_n'. Время, которое потребно для достижения номинальной скорости ω_n, после того, как двигатель достиг скорости ω_n', обычно не учитывается и при расчетах определяется лишь период времени, который связан с включением ступеней реостата.

Для удобства дальнейших рассуждений полезно ввести выражение для электрического коэффициента полезного действия якоря двигателя при номинальных условиях работы, т. е. отношение электромагнитной мощности к получаемой при выключенном совершенно сопротивлении пускового реостата, т. е.

$$\eta = \frac{E_n \cdot I_n}{E_n \cdot I_n + I_n^2 \cdot R_m} = \frac{E_n}{E_n + I_n \cdot R_m} = \frac{E_n}{E_k} = \frac{\omega_n}{\omega_s} \qquad 113$$

Для момента начала выключения всего сопротивления пускового реостата уравнение 104 принимает вид:

$$E_n' + I \cdot R_m = E_k,$$

а для установившегося состояния

$$E_n + I_n \cdot R_m = E_k\,*.$$

Если обозначить отношение пускового тока к номинальному посредством

$$j = \frac{I}{I_n}$$

и принять во внимание предыдущие уравнения, то

$$j = \frac{E_k - E_n'}{E_k - E_n} = \frac{\omega_s - \omega_n'}{\omega_s - \omega_n}, \qquad 114$$

откуда после преобразований и использования уравнения 113 получается:

$$\frac{\omega_n'}{\omega_n} = \frac{1}{\eta}\left[1 - j(1 - \eta)\right] \qquad 115$$

Таким образом, пользуясь уравнениями 112 и 115, можно определить общее время пуска двигателя t_s, заменяя в уравнении 112 полученные величины t и ω соответственно посредством t_s и ω_n':

$$t_s = T_s \frac{1 - j(1 - \eta)}{\eta(1 - \alpha)} \qquad 116$$

* Для вторичной цепи трехфазных двигателей это уравнение несправедливо, так как напряжение E_k не остается постоянным (см. стр. 800).

Выражение для периода пуска в ход двигателя можно изобразить несколько иначе, если принять во внимание уравнения 112, 113 и 115 и подставить значения переменных величин, соответствующие крайнему положению подвижного контакта, т. е.

$$\omega = \omega_n', \quad t = t_s \text{ и } R = R_m,$$

тогда

$$t_s = T_s \cdot \frac{\omega_n'}{\omega_n} \cdot \frac{1}{(1-\alpha)} \qquad 117$$

Из уравнения 115 следует, что

$$\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right) = \frac{\omega_n'}{\omega_s};$$

помножая обе части последнего равенства на ω_n, находят:

$$\omega_n\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right) \eta \cdot \omega_n' \quad \text{и} \quad \frac{\omega_n'}{\omega_n} = \frac{1 - \frac{R_m}{R_1}}{\eta}.$$

Если поставить последнее соотношение в уравнение 116, то получается:

$$t_s = T_s \cdot \frac{\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right)}{\eta\,(1-\alpha)}. \qquad 118$$

В идеальном случае, когда сопротивление якорной обмотки $R_m = 0$ и, следовательно, $\eta = 1$, время пуска выражается формулой:

$$t_s = \frac{T_s}{1-\alpha} \qquad 118\,\text{a}$$

При идеальном холостом ходе, когда $\alpha = 0$, период пуска равен $t_s = T_s$, т. е. время разбега равно постоянной времени, что было уже упомянуто при определении этой величины.

§ 38. Нагревание сопротивлений. — Общее сопротивление пускового реостата, при котором сила пускового тока имеет некоторое определенное значение, может быть найдено из соотношения 104 а. Однако при одном и том же сопротивлении реостата является возможным применить различные количества материала, идущего на изготовление самого сопротивления, путем вариирования длины и поперечного сечения. Для решения вопроса, какие же размеры придать сопротивлению, необходимо ввести еще некоторые дополнительные условия. Этим условием является предельная температура нагрева сопротивлений реостата для надежных условий работы, которая

может колебаться в значительных пределах в зависимости от устройства реостата и элементов сопротивления. Когда для построения какого-либо сопротивления хотят использовать небольшие количества материала, то обычно реостат проектируется так, чтобы каждая часть тела сопротивления за время пуска достигла заданной допустимой температуры.

В главе о нагревании тел указывалось на то, что можно по свойствам тела сопротивления (теплоотдача, постоянная времени нагрева) и роду нагрузки (продолжительная, перемежающаяся) определить коэффициент перегрузки, а следовательно, и эквивалентную мощность для продолжительной нагрузки, обращающуюся в тепло. Так как эквивалентная продолжительная мощность соответствует установившемуся тепловому состоянию тела, то она, следовательно, может служить, в некотором роде, мерой количества материала, потребного для осуществления того или иного сопротивления. На основании уравнения теплового равновесия

$$P_o = o \cdot S \cdot \tau = \frac{P}{p} \cdot o \cdot S \cdot \tau,$$

где

P_o — продолжительная мощность,
o — коэффициент теплоотдачи,
S — поверхность охлаждения и
τ — повышение температуры.

Таким образом, зная из последнего уравнения значения P, p, τ и o, является возможным определить поверхность охлаждения сопротивления, а затем и геометрические размеры самого сопротивления.

Если далее обозначить количество теплоты, развивающееся в элементе сопротивления в единицу времени, посредством $I^2 \cdot dR$, то эквивалентную тепловую мощность, поглощаемую при продолжительной нагрузке этого элемента, можно выразить так:

$$dP_o = \frac{I^2 \cdot dR}{P} = \frac{1 - e^{-\frac{t}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}} I^2 . dR. \qquad 118\text{ b}$$

Полный период времени включения реостата t_p в дальнейшем можно считать постоянной величиной; такое положение не вносит никаких изменений в самый процесс пуска в ход двигателя.

Для удобства в дальнейшем вводится обозначение

$$\psi = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}, \qquad 119$$

после чего получается:

$$P_o = \phi \int_{R_m}^{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) I^2 dR. \qquad 120$$

Если предположить, что нагрузочный момент остается в течение всего пуска постоянным, т. е. $\alpha = Const$, то сопротивление пускового реостата в функции времени можно представить уравнением 105 а, и тогда (см. уравнения 112 и 113) получается:

$$\frac{R}{R_1} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s} \cdot \frac{\omega_n}{\omega_n} = 1 - \eta \frac{\omega}{\omega_n} = 1 - \eta (1 - \alpha) \frac{t}{T_s}.$$

Дифференцирование последнего уравнения по времени дает:

$$dR = - R_1 \eta \frac{1 - \alpha}{T_s} dT.$$

С целью получения выражения для P_o, последнее уравнение подставляют в уравнение 120 при соответственном изменении пределов интеграции и находят, что

$$P_o = \phi I^2 \cdot R_1 \eta \cdot \frac{1 - \alpha}{T_s} \int_0^{t_s} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) dt.$$

Интегрирование последнего выражения производится довольно просто, и после подстановки пределов получается следующий результат:

$$P_o = \phi \cdot \frac{I^2 R_1}{T_s} \eta (1 - \alpha) \left[t_s - T\left(1 - e^{-\frac{t_s}{T}}\right)\right]. \qquad 121$$

Для дальнейших выкладок необходимо принять во внимание еще следующее соотношение:

$$I^2 \cdot R_1 \cdot T_s \cdot \eta = E_n \cdot I \cdot T_s = P_a \cdot T_s = M \cdot \omega_n \cdot T_s = \Theta \cdot \omega_n^2 = 2A_n, \qquad 122$$

где P_a и A_n — величины, входящие ранее в уравнение 109, представляют собой максимальную пусковую мощность двигателя и кинетическую энергию при номинальном числе оборотов двигателя.

На основании уравнения 122 выражение 121 принимает вид:

$$P_o = \phi P_a (1 - \alpha) \frac{T}{T_s} \left[\frac{t_s}{T} - 1 + e^{-\frac{t_s}{T}}\right]. \qquad 123$$

В большинстве практических случаев постоянная времени нагрева для нормальных пусковых реостатов очень велика сравнительно с

полным периодом пуска t_s, а потому величина $\frac{t_s}{T}$ очень мала, и практически ею можно пренебречь. После разложения в уравнении 123 оставшейся части выражения, стоящего в скобках, т. е. экспоненциальной функции $e^{-\frac{t_s}{T}}$, в ряд, выражение 123, если при разложении ограничиться тремя членами ряда, принимает вид:

$$P_o = \psi P_a (1 - \alpha) \frac{T}{T_s} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{t_s}{T}\right)^2. \qquad 124$$

Помножая эту величину на постоянную времени нагрева T и производя необходимые преобразования на основании уравнения 122, находят теплоемкость всего реостата:

$$Q = P_o \cdot T = \psi \frac{2A_n}{T_s} (1 - \alpha) \frac{T^2}{T_s} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{t_s}{T}\right)^2 = \psi A_n (1 - \alpha) \left(\frac{t_s}{T}\right)^2. \qquad 125$$

В том случае, когда период нагрузки пускового реостата очень мал по сравнению с постоянной времени нагрева, в выражении для ψ можно разложить в ряд экспоненциальную функцию и ограничиться только квадратным членом этого ряда; тогда $\psi = \frac{T}{t_p}$, где t_p — полный период одного цикла включения реостата (нагрев и охлаждение):

$$P_o \cdot t_p = A_n (1 - \alpha) \left(\frac{t_s}{T_s}\right)^2. \qquad 126$$

В случае редкого пуска двигателя (около одного или двух раз в сутки) реостат охлаждается так, что температура реостата за время покоя может снизиться до температуры окружающей среды. Если в уравнении 119 принять $t_p = \infty$, то $\psi = 1$, и тогда уравнение 125 приобретает вид:

$$Q_o = P_o \cdot T = A_n (1 - \alpha) \left(\frac{t_s}{T_s}\right)^2. \qquad 127$$

Правые стороны уравнений 125, 126 и 127 можно написать несколько иначе; для этого нужно вернуться к зависимости периода пуска двигателя от его угловой скорости, т. е. к уравнению 112

$$Q_o = \frac{A_n}{1 - \alpha} \left(\frac{\omega_n'}{\omega_n}\right)^2.$$

Так как

$$A_n \left(\frac{\omega_n'}{\omega_n}\right)^2 = \frac{1}{2} \Theta \omega_n^2 \left(\frac{\omega_n'}{\omega_n}\right)^2 = \frac{1}{2} \Theta \omega_n'^2 = A_n'$$

выражает кинетическую энергию движущихся масс в конце пуска, а $1-\alpha=\frac{D-M}{D}=\frac{M_b}{D}$ (где M_b означает ускоряющий момент), то

$$Q_0 : A_n' = D : M_b, \qquad 128$$

т. е. теплоемкость пускового реостата, обладающего большой постоянной времени нагрева или, что то же самое, поглощаемая реостатом энергия так относится к кинетической энергии вращающихся масс, как пусковой крутящий момент двигателя к ускоряющему моменту.

Если умножить обе части уравнения 123 на T и принять во внимание уравнение 122, то получается:

$$P_0 \cdot T = Q = \psi A_n (1-\alpha)\, 2\, \frac{T^2}{T_s^2}\left[\frac{t_s}{T} - 1 + e^{-\frac{t_s}{T}}\right], \qquad 129$$

т. е. последнее уравнение выражает теплоемкость реостата для любой постоянной времени нагрева, т. е. когда отношение $\frac{t_s}{T}$ не столь мало, чтобы им можно было пренебречь.

Теплоемкость реостата можно выразить в виде относительной величины, если разделить уравнение 129 на 127, и тогда отношение действительной теплоемкости к теплоемкости реостата при бесконечно-большом периоде охлаждения получается равным:

$$\frac{Q}{Q_0} = \psi \cdot 2 \left(\frac{T}{T_s}\right)^2 \left[\frac{t_s}{T} - 1 + e^{-\frac{t_s}{T}}\right]. \qquad 129a$$

Уравнения со 123 по 126 можно рассматривать и как зависимость тепловой мощности и теплоемкости пускового реостата от времени, если заменить в этих уравнениях постоянную величину t_s — время разбега — текущей переменной t. Такую же замену можно произвести и в уравнениях 129 и 129 а. Таким образом тепловая мощность при продолжительной нагрузке P_0 теперь является мерой потребного количества материала для той части сопротивления, которая остается включенной до данного момента времени t.

§ 39. Ход расчета для изменяющегося нагрузочного момента ($\alpha = var$). — Ранее рассматривался случай, когда нагрузка на валу двигателя оставалась постоянной в течение всего времени пуска. Однако на практике часто встречается, что нагрузочный момент не остается постоянным, а меняется в зависимости от числа оборотов двигателя. Прибегать в этом случае к аналитическому расчету нет надобности,

так как нагрузочный момент не может быть выражен простым уравнением и для вычисления потребовалось бы много времени, поэтому расчет пускового реостата для двигателей, во время пуска которых действует переменный нагрузочный момент, производится графическим способом.

Пусть α представляет собою некоторую функцию угловой скорости вращения двигателя, заданную графически. Тогда на основании уравнения 126 можно написать

$$t = \frac{T_s}{\omega_n} \int_0^{w} \frac{d\omega}{1-\alpha} \qquad 106\,b$$

Если известна зависимость $\alpha = f(\omega)$, то по этой функции легко может быть построена другая зависимость $\frac{1}{1-\alpha} = \varphi(\omega)$, и тогда интегральное выражение $\int_0^{\omega} \frac{\alpha\omega}{1-\alpha}$ представляется на диаграмме в виде площади, ограниченной этой кривой и осями координат; время, протекшее от начала пуска, на основании уравнения 106 b получается как результат умножения полученной площади на постоянную величину $\frac{T_s}{\omega_n}$.

Для удобства подсчетов и построения кривых рекомендуется пользоваться так называемыми относительными величинами времени и угловых скоростей, т. е. при построении диаграммы на оси абцисс откладывать отношения $\frac{\omega}{\omega_n}$, где ω_n — номинальная скорость вращения двигателя, а времена на диаграмме откладывают в виде отношения $\frac{t}{T_s}$, где T_s — постоянная времени разбега двигателя.

Для иллюстрации ниже приводится примерный расчет пускового реостата для шунтового двигателя мощностью 16,5 kW. Данные относительно этого двигателя таковы: номинальная сила тока якоря $I_n = 80\ A$, напряжение сети $E_k = 220\ V$, сопротивление обмотки якоря $R_m = 0{,}175\ \Omega$. Зависимость α от ω представлена на фиг. 128.

Электрический коэффициент полезного действия такого двигателя равен:

$$\eta = \frac{E_k - I_n \cdot R_m}{E_k} = \frac{220 - 80 \cdot 0{,}175}{220} = 0{,}936.$$

Для $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$, кривая $\alpha = f\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)$ имеет ординату, значение которой равно $\alpha = 0{,}8$; отсюда находится $j = \frac{I}{I_n} = \frac{D}{M} = \frac{1}{0{,}8} = 1{,}25$.

В момент времени, когда выводится все сопротивление реостата, относительная скорость двигателя приобретает значение (см. ур-ние 115):

$$\frac{\omega_n'}{\omega_n} = \frac{1}{\eta}\left[1 - j(1-\eta)\right] = \frac{1 - 1{,}25\,(1 - 9{,}36)}{0{,}936} = 0{,}983.$$

Этому значению относительной угловой скорости на диаграмме соответствует значение $\frac{t_s}{T_s} = 2{,}01$. Если принять кинетическую энергию якоря двигателя и сцепленных с ним масс равной $A_n = 90$ *k Joules*, то постоянная времени разбега на основании уравнения 109 а получается

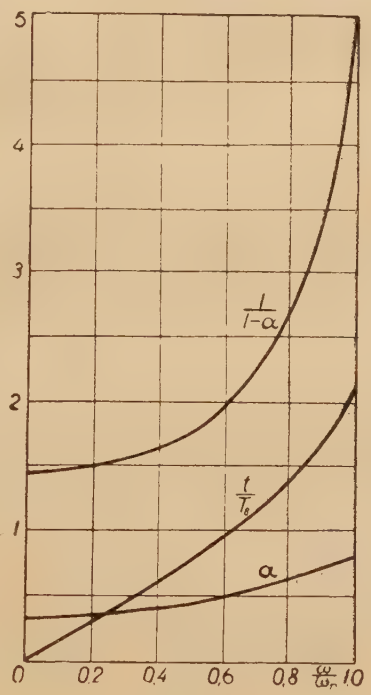
$$T_s = \frac{2A_n}{P_a} = \frac{2 \cdot 90}{1{,}25 \cdot 16{,}5} = 8{,}7 \ sec$$

и, следовательно, время разбега:

$$t_s = 2{,}01 \cdot 8{,}7 = 17{,}5 \ sec.$$

С целью определения размеров сопротивления необходимо вычислить предварительно продолжительную мощность, выражение которой может быть в общем виде представлено (см. уравнение 120) таким образом:

$$P_0 = \psi \int_{R_m}^{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) I^2 \cdot dR.$$



Фиг. 128.

Если принять во внимание, что

$$1 - e^{-x} = \int_0^x e^{-x}\,dx \text{ и } I^2 = \frac{P_a}{R_1 \cdot \eta},$$

и уравнение 122, то выражение для P_0 можно написать следующим образом:

$$P_0 = \psi \frac{P_a}{R_1 \eta} \int_{R_m}^{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) dR = \psi \frac{P_a}{R_1 \eta} \int_{R_m}^{R_1} dR \int_0^t \frac{e^{-\frac{t}{T}}}{T}\,dt.$$

Посредством интегрирования по частям и подстановки соответствующих пределов интегрирования ($R = R_m$, $t = t_s$ и $R = R_1$, $t = 0$) последнее

выражение принимает вид:

$$P_o = \psi \frac{P_a}{R_1 \eta T}\left[R\int_0^t e^{-\frac{t}{T}}dt - \int Re^{-\frac{t}{T}}dt\right]_{R_m, t_s}^{R_1, 0} =$$

$$= \psi \frac{P_a}{R_1 \eta \cdot T}\left[-R_m\int_0^{t_s} e^{-\frac{t}{T}}dt + \int_0^{t_s} R\cdot e^{-\frac{t}{T}}dt\right]$$

или

$$P_o = \psi \frac{P_a}{\eta}\int_0^{t_s} \frac{R - R_m}{R_1} e^{-\frac{t}{T}} \cdot \frac{dt}{T}. \qquad 130$$

Полученное уравнение легко решается графическим путем, если известна зависимость сопротивления R от времени. Пусть $R = f(t)$ изображена в виде кривой, тогда, пользуясь этой кривой, строят другую кривую $(R - R_m)e^{-\frac{t}{T}} = \varphi(t)$ и по площади, ограниченной построенной кривой и осями, находят значения интеграла $\int_0^{t_s} \frac{R - R_m}{R_1} e^{-\frac{t}{T}} \cdot \frac{dt}{T}$.

При построении диаграммы, однако, рекомендуется откладывать по оси абсцисс не t, а отношение $\frac{t}{t_s}$. Тогда, вводя обозначение $t_s' = \frac{t_s}{T}$, уравнение 130 принимает вид:

$$P_o = \psi P_a \cdot \frac{t'_s}{\eta}\int_0^1 \frac{R - R_m}{R_1} e^{-\frac{t_s' t}{t_s}} d\frac{t}{t_s}. \qquad 131$$

В большинстве практических случаев постоянная времени нагрева настолько велика по сравнению с постоянной времени пуска двигателя, что значение экспоненциальной функции для $T \cong \infty$ можно принять равным единице, т. е.

$$e^{-\frac{t_s' t}{t_s}} = e^{-\frac{t}{T}} = 1$$

и тогда уравнение 131 принимает следующий вид:

$$P_o = \psi P_a \cdot \frac{t_s'}{\eta}\int_0^1 \frac{R - R_m}{R_1} d\frac{t}{t_s}, \qquad 132$$

и общая теплоемкость реостата выражается так:

$$Q = P_o \cdot T = \phi A_n \frac{2t_s}{\eta T_s} \int_0^1 \frac{R - R_m}{R_1} d\frac{t}{t_s} \qquad 133$$

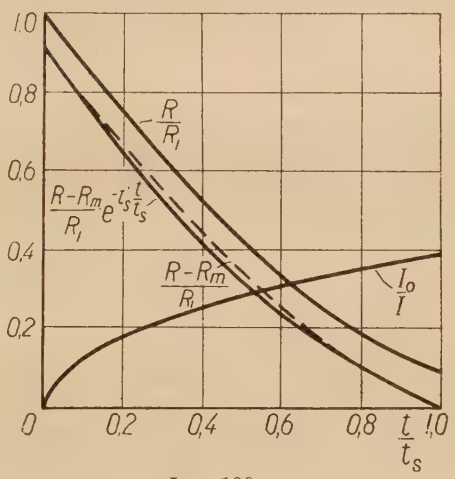
Таким образом, согласно уравнениям 132 и 133, можно определить расчетную мощность и теплоемкость системы для случая пуска в ход двигателя с переменным нагрузочным моментом. Нетрудно доказать, что уравнение 125 представляет частный вид уравнения 133, при $a = Const$.

Интеграл уравнения 132, как было уже сказано, может быть изображен в виде площади кривой

$$\frac{R}{R_1} = f\left(\frac{t}{t_s}\right)$$

с началом отсчета $R = R_m$.

Для иллюстрации вышеприведенные выводы можно приложить для примера расчета реостата.



Фиг. 129.

Постоянная времени нагрева для реотанового провода с диаметром 2 *mm*, и размещенного свободно в воздухе, равняется около $2 \div 2{,}5$ *min*. В данном случае принимается $T = 2$ *min*, тогда $t_s' = \frac{t_s}{T} = \frac{17{,}5}{120} = 0{,}146$.

Кривая $\frac{R - R_m}{R_1} = e^{-t_s' \frac{t}{t_s}} = f\left(\frac{t}{t_s}\right)$ представлена на фиг. 129. Площадь, заключенная между этой кривой и осями координат, составляет 0,365.

Если положить период времени между пусками очень большим ($t_p = \infty$ и $\phi = 1$) и принять во внимание, что $P_a = j \cdot P_n$, то расчетная мощность находится путем вычисления по формуле 131:

$$P_o = 1{,}25 \cdot 16{,}5 \frac{0{,}146}{0{,}936} \cdot 0{,}365 = 1{,}17 \ kW.$$

Если сопротивление выполнено в виде спирали, навитой на фарфоровый цилиндр, то постоянную времени нагрева можно положить равной 15 *min* и, следовательно, $t_s' = \frac{1{,}75}{900} = 0{,}0195$. Так как эта

величина очень мала, то при вычислении интеграла уравнения 131 можно принять, что в экспоненциальной функции $t'_s = 0$, и тогда площадь, ограниченная кривой $\frac{R - R_m}{R_1} = f\left(\frac{t}{t_s}\right)$, которая на фиг. 129 нанесена пунктиром, и осями координат должна выражать значение интеграла. При этих условиях из диаграммы фиг. 129 получается, что $\int\limits_0^1 \frac{R - R_m}{R_1} d\left(\frac{t}{t^s}\right)$ равен 0,383, и расчетная продолжительная мощность в этом случае

$$P_o = 1{,}25 \cdot 16{,}5 \frac{0{,}0195}{0{,}936} \cdot 0{,}383 = 0{,}165 \ kW.$$

Как видно из результатов графического интегрирования для двух различных случаев, т. е. для постоянных времени нагрева $T = 2$ *min* и $T = 15$ *min*, практически совершенно достаточно пользоваться кривой $\frac{R - R_m}{R_1} = f\left(\frac{t}{t^s}\right)$; при этом возможная ошибка составляет лишь

$$\frac{0{,}383 - 0{,}365}{0{,}365} \cdot 100 = 5\%.$$

Вышеприведенный расчет выполнен для случая плавного пуска в ход двигателя. В действительности же при применении металлического реостата приходится сопротивление изменять не плавно, а ступенями, причем размеры ступеней и число их выбираются так, чтобы во время пуска в ход двигателя колебания силы тока были по возможности малы. Если перемещение подвижного контакта с целью включения ступеней сопротивления происходит с равномерной скоростью, то все ступени получаются одинаковыми. Пользуясь диаграммой фиг. 129, можно легко установить как число ступеней, так и сопротивление и продолжительность включения каждой ступени, и на основании этих данных определить размеры тела сопротивления.

Пусть r — сопротивление каждой ступени, а t время нагрузки этой ступени; тогда энергия, поглощаемая этой ступенью, равняется $I^2 \cdot r \cdot t$. Для определения значения расчетной силы тока I_o может быть применено уравнение:

$$p \cdot I^2 \cdot r \cdot t \cong I_o^2 \cdot r \cdot T, \text{ так как при } \frac{t}{T} \cong 0, \ p = \frac{T}{t}, \text{ то}$$

$$I_o^2 \cdot r \cdot t = I^2 \cdot p \cdot T,$$

отсюда

$$I_o = I \sqrt{\frac{t}{T}}.$$

В разбираемом примере указано, что пусковой ток должен составлять $I = 1{,}25 \cdot I_n = 1{,}25 \cdot 80 = 100 \ A$, а постоянная времени нагрева

$T = 120$ *sec*. Расчетная сила тока для ступени, находящейся во время пуска в ход двигателя под током в течение например $0{,}4t_s$, составляет

$$I_o = I\sqrt{\frac{t}{T}} = 1{,}25 \cdot 80\sqrt{\frac{0{,}4 \cdot 17{,}5}{120}} = 24{,}2A.$$

Таким способом можно подсчитать значения I_o для других значений $\frac{t}{t_s}$ и по полученным результатам построить кривую $\frac{I_o}{I} = f\left(\frac{t}{t_s}\right)$, как это выполнено на диаграмме фиг. 129.

§ 40. Расход энергии при пуске. — Энергия, которую двигатель берет из сети во время своего пуска, частично поглощается сопротивлением реостата и обращается в тепло, частично идет на преодоление полезного крутящего момента, приложенного к валу двигателя, на покрытие потерь, а затем на ускорение движущихся масс, т. е. на накопление кинетической энергии. Здесь, как и раньше, полагается, что пуск требуется плавный, т. е. что пусковой реостат является или жидкостным или металлическим с большим числом ступеней, и что пусковой ток, а с ним и крутящий момент, развиваемый двигателем, остаются постоянными в течение всего периода пуска.

В таком случае количество энергии, поглощаемой реостатом в течение всего пуска, выражается интегралом в пределах $t = 0$ и $t = t_s$, т. е.

$$A_R = \int_0^{t_s} I^2 \cdot R\,dt = I^2 \int_0^{t_s} R\,dt. \qquad 134$$

Энергия, затраченная на сообщение ускорения движущимся массам, составляет:

$$A_\theta = \int_0^{\omega_n'} \theta \cdot \omega d\omega = \frac{1}{2}\theta \cdot \omega_n'^2. \qquad 135$$

Приведенное ранее уравнение разбега двигателя

$$\frac{T_s}{\omega_n} \cdot \frac{d\omega}{dt} = (1 - \alpha)$$

может быть при применении уравнений 135 и 106 преобразовано в следующее:

$$A_\theta = \int_0^t D \cdot \omega (1 - \alpha)\,dt. \qquad 136$$

Однако это уравнение можно выразить через электрические величины, если принять во внимание, что $D \cdot \omega = E \cdot I$; электродвижущая сила

якоря двигателя в свою очередь может быть представлена на основании уравнения 104, как $E = E_k - I \cdot R$; напряжение же сети для первого момента пуска равно омическому падению напряжения в пусковой цепи двигателя, т. е. $E_k = I \cdot R_1$, где R_1 — общее сопротивление реостата и цепи якоря. На основании этих равенств получается

$$D \cdot \omega = E \cdot I = E_k \cdot I - I^2 \cdot R = I^2 \cdot R_1 - I^2 \cdot R = I^2 (R_1 - R)$$

и при подстановке этого выражения в уравнение 136 последнее принимает вид:

$$A_\theta = I^2 \int_0^{t_s} (R_1 - R)(1 - \alpha)\, dt. \qquad 137$$

Энергия, потребная для преодолевания нагрузочного момента в течение времени пуска, равняется

$$A_M = \int_0^t M \cdot \omega \cdot dt, \qquad 138$$

или, если заменить M посредством αD и принять во внимание предыдущее выражение для $D \cdot \omega$, то

$$A_M = I^2 \int_0^t (R_1 - R)\, \alpha dt. \qquad 139$$

Два последние вида расходуемой энергии, т. е. A_θ и A_M, полезно затрачиваются при пуске, так как один из них идет на преодоление нагрузочного момента, приложенного к валу двигателя, другой — аккумулируется в виде живой силы вращающихся масс, и общее выражение для их суммы может быть написано в виде:

$$A_D = A_M + A_\theta = I^2 \int_0^{t_s} (R_1 - R)\, dt. \qquad 140$$

Эта общая полезная работа, развиваемая двигателем, эквивалентна электрической энергии, развиваемой якорем двигателя, т. е.

$$A_D = \int_0^{t_s} E \cdot I \cdot dt.$$

Общее количество энергии, потребляемой из сети во время пуска двигателя, равняется:

$$A_1 = \int_0^{t_s} E_k \cdot I \cdot dt.$$

Так как $E_k = E + I \cdot R$, то

$$A_1 = \int_0^{t_s} E \cdot I \cdot dt + \int_0^{t_s} I^2 \cdot R \cdot dt = A_D + A_R.$$

Пользуясь уравнением 120, можно выразить тепловую емкость всего реостата:

$$Q = P_0 \cdot T = T \cdot \phi \int_{R_m}^{R_1} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) I^2 \cdot dR.$$

Для случая, когда $\frac{t}{T} \cong 0$ при $T = \infty$

$$\lim_{T=\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) T = \left[\frac{1 - e^{-\frac{t}{T}}}{\frac{t}{T}} \cdot t\right]_{T=\infty} = t$$

и, следовательно,

$$Q = I^2 \int_{R_m}^{R_1} t \cdot dR.$$

Интегрируя последнее уравнение по частям, получают:

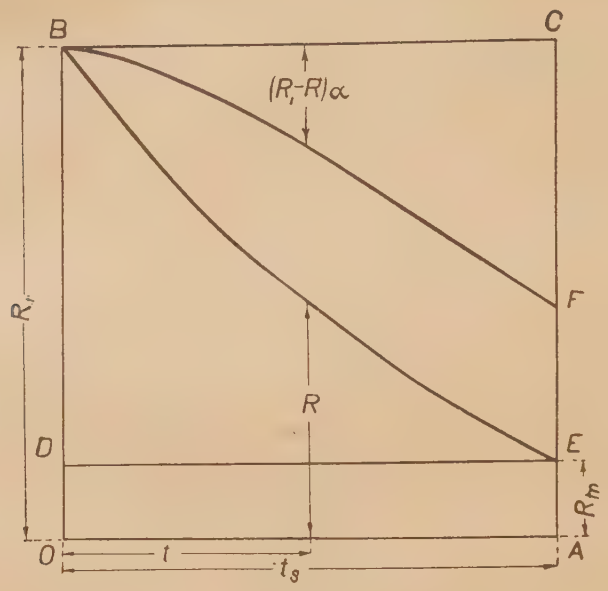
$$Q = I^2 \int_{R_m}^{R_1} t \cdot dR = I^2 \left[t \cdot R\right]_{t_s, R_m}^{0, R_1} - I^2 \int_{t_s}^{0} R \cdot dt = I^2 \int_0^{t_s} R \cdot dt - I^2 \cdot R_m \cdot t_s.$$

Таким образом

$$Q = A_R - A_j,$$

где A_j представляет собою энергию, идущую на нагревание обмотки якоря, обмотки дополнительных полюсов, если таковые имеются, и в сериес-двигателях обмотки главных полюсов.

Распределение энергии, поглощаемой при пуске, можно представить также и графически на диаграмме $R = f(t)$. Для этой цели строится зависимость $R = f(t)$, т. е. сопротивление цепи пускового тока якоря (с включением сюда сопротивления как самого якоря, так и соединительных проводов, сериесной обмотки и обмоток дополнительных



Фиг. 130.

полюсов в функции времени (кривая BE на фиг. 130), и проводятся прямые $R=R_1$ $\overline{(BC)}$, $R=R_m$ $\overline{(DE)}$ и $t=t_s$ $\overline{(AC)}$. Далее отрезки между кривой BE и прямой $\overline{BC}$ делятся в отношении $\alpha:1$, т. е. находится кривая (если рассматривать от линии $\overline{BC}$) $(R_1-R)\cdot\alpha$ (кривая BF), и тогда отрезки ординат, заключенные между кривыми BF и BE, равны $(R_1-R)(1-\alpha)$.

Имея такую диаграмму, значение ранее приведенного интеграла можно представить себе как площадь последней фигуры, умноженную на квадрат пускового тока, т. е. на I^2. Таким образом

$$A_R=I^2\int_0^{t_s}Rdt=I^2\cdot\overline{OAEB},$$

$$A_\Delta=I^2\int_0^{t_s}[R_1-R](1-\alpha)\,dt=I^2\cdot\overline{BEF},$$

$$A_M=I^2\int_0^{t_s}[R_1-R]\,\alpha dt\qquad=I^2\cdot\overline{BFC},$$

$$A_D=I^2\int_0^{t_s}[R_1-R]dt\qquad=I^2\cdot\overline{BEC},$$

$$A_1 = I^2 \int_0^{t_s} R_1 dt \qquad = I^2 \cdot \overline{OACB},$$

$$Q = I^2 \int_{R_m}^{R_1} t dR \qquad = I^2 \cdot \overline{DEB},$$

$$A_j = I^2 \int_0^{t_s} R_m dt \qquad = I^2 \overline{OAED}.$$

На основании известных данных о количестве энергии как полезно затраченной, так и всей израсходованной за время процесса пуска, является возможным определить коэффициент полезного действия всего пускового процесса, т. е.

$$\eta_A = \frac{A_D}{A_1} = 1 - \frac{A_R}{A_1} \qquad 142$$

На основании предыдущих уравнений последнее соотношение представляется в виде:

$$\eta_A = \int_0^1 \left[1 - \frac{R}{R_1}\right] d\left(\frac{t}{t_s}\right) = \int_0^1 \frac{E}{E_k} \cdot d\left(\frac{t}{t_s}\right) = \int_0^1 \eta_t \cdot d\left(\frac{t}{t_s}\right). \qquad 142a$$

где η_t — мгновенный коэффициент полезного действия цепи якоря для любого момента времени пускового процесса. Как показывает уравнение 142 а, коэффициент полезного действия пуска представляет среднее значение из всех мгновенных значений η_t.

Выше было указано, как графическим способом, пользуясь кривыми фиг. 130, можно в общем виде определить количество энергии, частично обращенной в полезную работу, частично в тепло во время пуска в ход двигателя. Однако в некоторых частных случаях можно применить для подсчета количества энергии и аналитический метод. Так например, когда нагрузочный момент двигателя остается постоянным в течение всего пуска, это определение можно сделать следующим образом:

Из уравнений 105а, 112 и 113 следует, что $\frac{R}{R_1} = 1 - \eta_1 (1 - \alpha) \frac{t}{T_s}$. 143

Отсюда находится R, и подставляя полученное значение в уравнение 134 получают:

$$A_R = I^2 \int_0^{t_s} R_1 \left[1 - \eta_1 (1 - \alpha) \frac{t}{T_s}\right] dt = I^2 \cdot R_1 \cdot t_s \left[1 - \frac{1}{2} \eta_1 (1 - \alpha) \frac{t_s}{T_s}\right]$$

На основании уравнения 122 получается:

$$I^2 \cdot R_1 = \frac{2A_M}{\eta \cdot T_s} = 2\eta \frac{A_s}{T_s}$$

где $A_s = \frac{1}{2}\theta \cdot \omega_s^2$, т. е. кинетическая энергия движущихся масс при предельной скорости вращения ω_s.

Если принять также во внимание уравнение 118, то выражение для энергии, обращающейся в тепло, приобретает вид:

$$A_R = A_s \frac{1}{1-\alpha}\left[1 - \left(\frac{R_m}{R_1}\right)^2\right]$$

Аналогичным способом вычисляют интегралы и других видов энергии, расходуемой во время пуска, т. е.

$$A_\theta = A_s\left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right]^2,$$

$$A_M = A_s \frac{\alpha}{1-\alpha}\left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right]^2,$$

$$A_1 = A_s \frac{1}{1-\alpha}\left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right]^2,$$

$$Q = A_s \frac{1}{1-\alpha}\left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right]^2,$$

Пусковой коэффициент полезного действия получается равным:

$$\eta_A = \frac{1}{2}\left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right].$$

Особый интерес представляет случай пуска при идеальном холостом ходе, и когда двигатель не имеет потерь.

В этом случае $\alpha = 0$, $R_m = 0$, $\eta = 1$ и $A_n = A_s$, и предыдущие уравнения, выведенные для постоянного нагрузочного момента, принимают следующий вид:

$$A_R = A_n;\ A_\theta = A_n;\ A_M = 0;\ A_1 = 2A_n;\ Q = A_n.$$

Последние уравнения показывают, что из общей поглощаемой при пуске энергии, равной $A_1 = 2A_n$, одна половина идет на накопление кинетической энергии вращающихся частей, а другая половина — на нагревание сопротивлений, включенных последовательно в цепь якоря двигателя. Коэффициент полезного действия пускового процесса составляет в этом случае 50%.

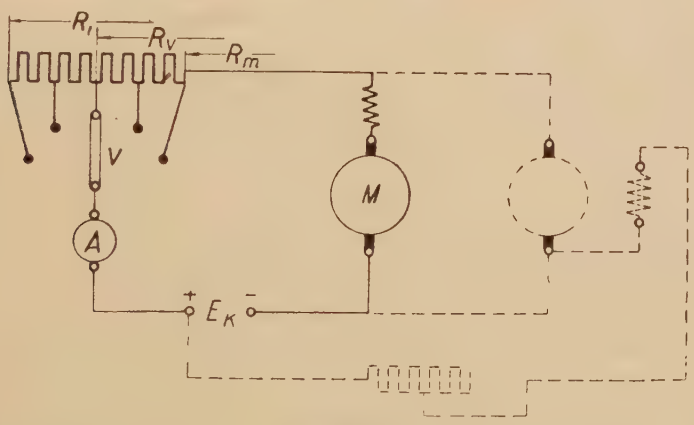
*

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

СТУПЕНЧАТЫЙ ПУСК В ХОД ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*

§ 41. Основные определения и положения. — Во время пуска в ход двигателя посредством реостата, состоящего из нескольких ступеней сопротивления, переход подвижного контакта из одного положения в другое сопровождается коротким замыканием ступени сопротивления, вызывающим мгновенное повышение силы тока. На фиг. 131



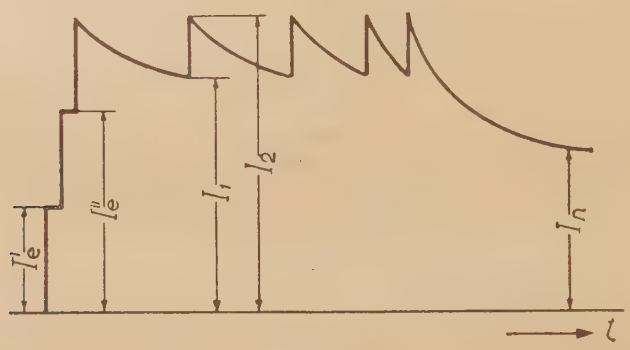
Фиг. 131.

изображена схема пуска в ход двигателя при помощи ступенчатого реостата, — а на фиг. 132 *a* представлена зависимость изменения силы тока от времени пуска.

На фиг. 132 *b* приведены осциллограммы пускового тока для двигателей постоянного тока.

Нормально пуск в ход при помощи ступенчатого реостата осуществляется таким образом, что максимальный пусковой ток I_2 (см. фиг. 132) при переходе с одной ступени на другую имеет одно и то же значение, допустимое для данного реостата и двигателя.

После того, как подвижной контакт установлен в определенном положении, необходимо выждать некоторый промежуток времени; в течение этого времени происходит ускорение вращения двигателя, и сила тока начинает постепенно спадать, и как только сила тока достигает соответствующего значения I_1, которое можно наблюдать по амперметру, включенному в цепь якоря двигателя, производится дальнейшее перемещение контакта. Ток I_1 называется **током переключения**.



Фиг. 132 *a*.

Таким образом за весь период пуска в ход двигателя сила тока колеблется в пределах от I_2 до I_1. По окончании пуска в ход в цепи якоря устанавливаются сила тока I_n и скорость вращения n_n.

Для смягчения толчка тока при включении цепи якоря двигателя пусковой реостат снабжается одной или несколькими **предварительными** ступенями; при нахождении подвижного контакта в положениях, соответствующих предварительным ступеням, по цепи

Фиг. 132 *b*.

якоря двигателя течет так называемый **ток включения** I'_e, I''_e..., причем эти токи не способны еще привести во вращение двигатель.

При расчете или выборе ступенчатого реостата для пуска в ход двигателя необходимо принимать во внимание все условия пуска как в электрическом отношении, так и в механическом.

Величинами, характеризующими пусковые условия и имеющими значение при выборе и расчете реостата, являются следующие:

1. Данные относительно самого двигателя: номинальная мощность — P_n, поглощаемая мощность — P_1, коэффициент полезного действия — η_n, номинальное напряжение на зажимах — E_{kn}, номинальный ток — I_n, скорость вращения — n_n, маховой момент вращающихся масс как самого двигателя, так и сцепленных с ним машин, — GD^2, сопротивление якоря и соединительных проводов — R_m, процент магнитного насыщения — μ_p.

2. Ток включения — I_e', или ток, устанавливающийся при первом положении подвижного контакта на предварительных ступенях.

3. Отношение максимального пускового тока к номинальному, или $\frac{I_2}{I_n}$.

4. Отношение тока переключения к номинальному току, или $\frac{I_1}{I_n} = j$.

5. Отношение максимального пускового тока к току переключения или $\frac{I_2}{I_1} = \lambda$.

6. Средняя пусковая мощность — P_m, или произведение номинального напряжения E_{kn} на средний пусковой ток $I_m = \sqrt{I_2 \cdot I_1}$. ($P_m = E_{kn} \cdot \sqrt{I_2 \cdot I_1} = E_{kn} \cdot I_m$).

7. Период пуска в ход — t_m, или время, в течение которого ток протекает только по пусковым ступеням.

8. Число пусков — Z, или число следующих друг за другом пусков с паузами t_b между ними, равными двум периодам пуска t_a ($t_b = 2t_a$), которые необходимы для того, чтобы повышение температуры достигло допустимого предельного значения.

9. Частота пуска — f_h, или число пусков в час, которое можно произвести с тем, чтобы нагрев реостата не превысил допустимых предельных значений.

10. Тяжесть пуска, — определяемая отношением средней пусковой мощности к мощности, которая потребляется двигателем при полной номинальной нагрузке.

Для определения размеров пускового реостата в первую очередь необходимо учесть среднюю пусковую мощность, потребную для создания ускорения вращающихся масс двигателя и сцепленных с ним машин, а также тяжесть пуска и период пуска.

В двигателях мощностью до 100 kW отношения максимального пускового тока к номинальному берутся равными $\frac{I_2}{I_n} = 1{,}55 \div 1{,}45$; причем бо́льшие значения соответствуют токам для двигателей меньших мощностей. Отношения же тока переключения к номинальному принимаются равными $\frac{I_1}{I_n} = 1{,}11 \div 1{,}17$; здесь меньшие значения относятся к двигателям меньших мощностей.

Тяжесть пуска в ход двигателя можно также выразить как отношение среднего пускового тока к номинальному, т. е. посредством:

$$\frac{I_m}{I_n} = \frac{\sqrt{I_2 \cdot I_1}}{I_n} = \sqrt{\frac{I_2}{I_1} \cdot \frac{I_1^2}{I_n^2}} = j\sqrt{\lambda}.$$

Нормальные значения тяжестей пуска — $j\sqrt{\lambda}$ приведены в таблице 25:

Таблица 25

Значения $j\sqrt{\lambda}$

Род пускового реостата	Пуск при половинной нагрузке	Пуск при полной нагрузке	Пуск при тяжелых условиях
Реостаты с плоским и барабанным переключателем	0,65	1,3	1,7
Реостаты с вальковыми переключателями	0,75	1,5	2,0

Период пуска в ход точно определяется согласно ниже приводимым аналитическим и графическим способам. Для двигателей мощностью до 200 *kW* период пуска в ход под полной нагрузкой может быть вычислен с достаточным приближением по следующей формуле:

$$t_a = 4 + 2\sqrt{P_n}\ kW\ sec. \qquad 144$$

Допустимые значения числа пусков Z и частоты f_h зависят главным образом от тепловых свойств реостата и условий охлаждений. Для пусковых реостатов с воздушным охлаждением $Z = 4 \div 2$, а $f_h = 5 \div 3$; реостаты с масляным заполнением, служащие для пуска в ход двигателей мощностью до 100 *kW*, имеют $Z = 10 \div 3$, а $f_h = 4 \div 11{,}6$, причем большие значения относятся к реостатам малых двигателей.

В основном расчет пусковых реостатов сводится к определению числа пусковых ступеней, значений сопротивлений каждой ступени и к нахождению геометрических размеров элементов сопротивлений, причем в отношении нагрева реостат должен удовлетворять существующим нормам.

Сопротивление цепи якоря и соединительных проводов, если значение такового не дано, может быть вычислено с достаточным приближением по формуле: $R_m = \frac{2}{3} \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{P_n}{I_n^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1-\eta}{\eta} \cdot \frac{E_{kn}}{I_n}$.

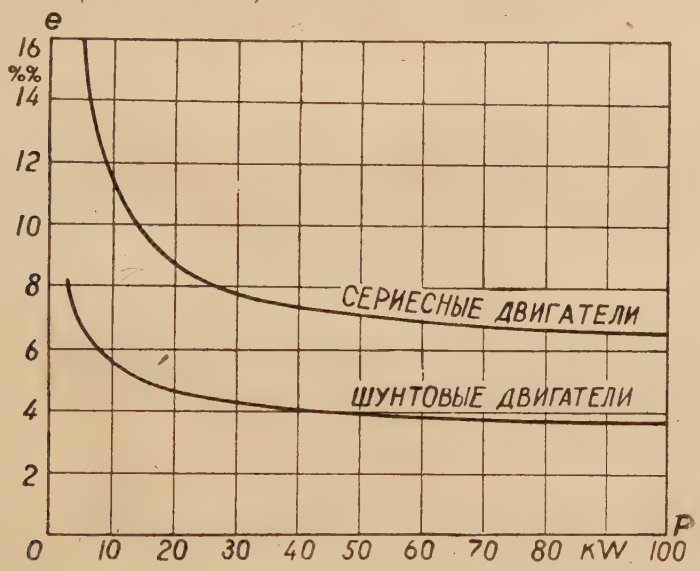
На фиг. 133 приведены средние значения в процентах: $e = \frac{I_n \cdot R_m}{E_{kn}} \cdot 100$ для сериесных и шунтовых двигателей мощностью до 100 kW.

Пусть

λ — отношение максимального пускового тока I_2 к току переключения I_1,

R_ν — сопротивление всей цепи якоря, когда рычаг реостата стоит на ν-й ступени,

E_ν — электродвижущая сила, наводимая в якоре в конце промежутка времени включения ν-го контакта, т. е. перед переходом на следующий $\nu + 1$-й контакт,



Фиг. 133.

$E'_{\nu-1}$ — электродвижущая сила якоря в момент начала включения ν-го контакта,

I — сила тока в любой момент пуска в ход,

E — электродвижущая сила в любой момент,

E_k — напряжение источника тока в цепи якоря.

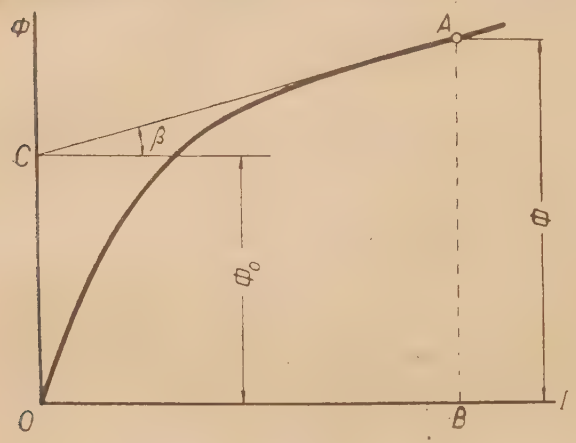
Если пренебречь явлением самоиндукции, имеющим место в цепи при всяком изменении силы тока, то связь между обозначенными выше величинами можно установить посредством закона Ома, который для данного случая выражается таким образом:

$$E_k = E_{\nu-1} + I_1 \cdot R_{\nu-1} = E'_{\nu-1} + I_2 \cdot R_\nu = E_\nu + I_1 \cdot R_\nu = E + I \cdot R_\nu,$$

или

$$E_k = E_{\nu-1} + \frac{I_2}{\lambda} R_{\nu-1} = E'_{\nu-1} + I_2 \cdot R_\nu = E + \frac{I_2}{\lambda} R_\nu = E + I \cdot R_\nu. \quad 145$$

Электродвижущие силы $E_{\nu-1}$ и $E'_{\nu-1}$, наводимые обмотке в якоря в период перемещения контакта из одного положения в другое, остаются более или менее постоянными только лишь в случаях пуска в ход шунтовых двигателей, так как в этот период $n \cong const$ и $\Phi \cong const$. У сериесных же двигателей магнитный поток зависит от силы тока в цепи якоря, и эта зависимость может быть представлена графически в виде кривой намагничивания, изображенной на фиг. 134. Если через точку A, характеризующую магнитное состояние двигателя, провести касательную к кривой намагничивания до пересечения с осью ординат, то отношение отрезков $\overline{OC} = \Phi_o$ и $\overline{AB} = \Phi$ представляет, как известно, так называемое относительное насыщение μ_ρ.



Фиг. 134.

$$\mu_\rho = \frac{\Phi_o}{\Phi},$$

при рассмотрении фиг. 134 видно, что

$$\Phi = \Phi_o + I \operatorname{tg} \beta = \Phi_o + I \frac{d\Phi}{dI};$$

откуда получается

$$\mu_\rho = \frac{\Phi - I\frac{d\Phi}{dJ}}{\Phi} = 1 - \frac{I}{\Phi} \cdot \frac{d\Phi}{dI} = 1 - \frac{1}{\mu_k},$$

где

$$\mu_k = \frac{dI}{d\Phi} : \frac{I}{\Phi}$$

и называется коэффициентом насыщения.

Пусть Φ — магнитный поток сериесного двигателя, соответствующий току цепи якоря или возбудителя I; тогда в предположении, что относительное насыщение магнитной системы двигателя в период переключения остается постоянным и равным относительному насыщению при силе тока I_2, справедливо следующее равенство:

$$\Phi - \Phi_2 = \left(\frac{d\Phi}{dI}\right)(I - I_2),$$

отсюда следует, что

$$\Phi = \mu_\rho \Phi_2 + (1 - \mu_\rho) \Phi_2 \frac{I}{I_2}. \qquad 146$$

Электродвижущая сила, наводимая в цепи якоря, равняется:

$$E = k \cdot \omega \cdot \Phi = k \cdot \omega \left[\mu_\rho \Phi_2 + (1 - \mu_\rho) \Phi_2 \frac{I}{I_2} \right].$$

Так как (см. формулу 102 а)

$$E_k = k \omega_s \Phi_2,$$

то

$$\frac{E}{E_k} = \frac{\omega}{\omega_s} \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I}{I_2} \right],$$

или

$$\frac{E}{E_k} = \frac{\omega}{\omega_s} \mu_\rho \left[1 + \frac{I}{J} \right], \qquad 147$$

где

$$J = \frac{\mu_\rho}{1 - \mu_\rho} \cdot I_2.$$

Последнее уравнение и выражает математический процесс пуска в ход двигателя постоянного тока. Для более наглядного изображения этого процесса Гёргес (Görges) предложил графический метод, состоящий в следующем: строятся прямоугольные координаты; по оси абсцисс откладывается отрезок $\overline{OA}$, равный напряжению E_k, а по оси ординат — отрезки $\overline{OC}$ и $\overline{OC'}$, соответственно равные токам I_1 и I_2 (фиг. 135).

Из равенства

$$E_k = E + I \cdot R$$

следует, что

$$I = \frac{E_k - E}{R}$$

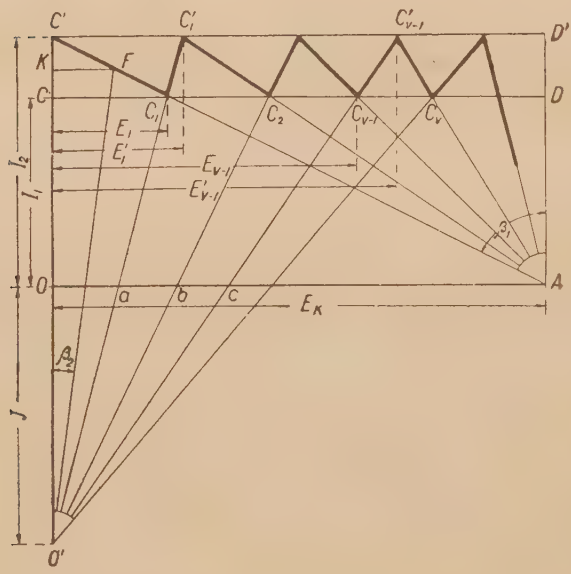
представляется графически на диаграмме для различных R в виде семейства прямых линий, сходящихся в точке A. На этих прямых берутся только те отрезки, которые заключены между прямыми $\overline{C'D'}$ и $\overline{CD}$, т. е. отрезки $\overline{C'C}$, $\overline{C_1'C_2} \ldots \overline{C'_{\nu-1} C_\nu}$ и т. д. Для определения точек C_1', $C_2' \ldots C'_\nu$, которые, как видно из дальнейшего, характеризуют сопротивление ступени, необходимо принять во внимание равенство:

$$\frac{E}{E_k} = \frac{\omega}{\omega_s} \mu_\rho \left[1 + \frac{I}{J} \right] = \frac{\omega}{\omega_s} \mu_\rho \left[\frac{I + J}{J} \right] = \frac{\mu_\rho}{\omega_s J} \omega [I + J].$$

Откуда получается, что

$$E = \frac{E_k}{I} \frac{\mu_\rho}{\omega_s} \omega (I + J) = Const\, \omega (I + J) \qquad 148$$

Последняя зависимость для различных угловых скоростей графически представляется на диаграмме фиг. 135 также в виде семейства прямых, которые сходятся в точке O', лежащей на оси отрицательных ординат, причем $\overline{OO'} = J = \frac{\mu_\rho}{1 - \mu_\rho} I_2$. На основании этих построений все дальнейшее относительно пуска в ход на диаграмме представляется таким образом: соединив точку C' с точкой A, получают отрезок $\overline{CC_1}$; этот отрезок графически изображает изменение силы пускового тока I в пределах от I_2 до I_1, в зависимости от наводимого в якоре напряжения E. За тот период времени пуска, когда подвижной контакт стоит в 1-м положении, тангенс угла β_1, образуемого прямой $\overline{C'A}$ с осью ординат, — представляет в соответствующем масштабе сопротивление R_1 цепи якоря для первого положения подвижного контакта реостата. Действительно в этом случае $\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{E_k}{I_2} = R_1$.



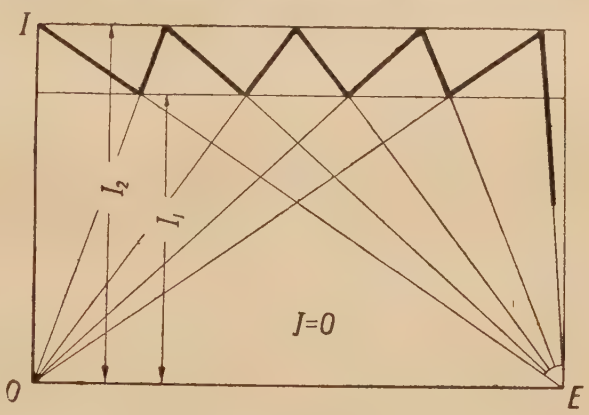
Фиг. 135.

Если теперь взять любую точку, например точку F, лежащую на отрезке $\overline{C'C}$, и соединить ее прямой с точкой O', тангенс угла β_2, образуемого этой прямой с осью ординат, дает представление об угловой скорости вращения двигателя; в самом деле, из фиг. 135 видно, что $\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{\overline{FK}}{\overline{KO'}}$ или так как $\overline{FK} = E$, а $\overline{KO'} = I + J$, то на основании уравнения 148 получается:

$$\operatorname{tg} \beta'_2 = \frac{E}{I + J} = Const \cdot \omega.$$

На основании этого тангенс угла, образуемого отрезком $\overline{O''C_1}$ с осью ординат, представляет угловую скорость, которую двигатель развивает в конце периода включения первой ступени реостата.

Так как короткое замыкание ступени сопротивления во время перехода подвижного контакта из одного положения в следующее происходит за весьма малый промежуток времени, в течение которого скорость вращения двигателя не успевает еще измениться, то точка C_1', характеризующая как силу тока I_2, так и электродвижущую силу E_1', должна лежать на продолжении прямой $\overline{O''C_1}$. Соединив точку C_1' с точкой A, находят точку C_2, а по углу β_1'' определяют сопротивление цепи якоря R_2 для второго положения контакта. Точка C_2' находится как пересечение продолжения прямой $\overline{O_1C_2}$ с прямой $\overline{C'D'}$; угол же β_2'', образуемый между $\overline{OC_2}$ и осью ординат, служит для нахождения скорости ω_2 для момента переключения контакта из 2-го в 3-е положение. Таким образом путем подобного графического построения находятся значения R, E и ω для остальных положений пусковой рукоятки реостата.



Фиг. 136.

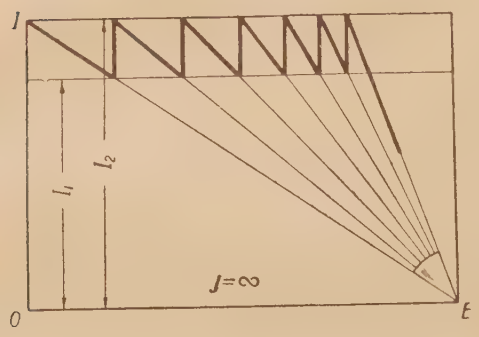
В частном случае, когда магнитная система двигателя ненасыщена, т. е. $\mu_\rho = 0$, значение J делается также равным нулю, диаграмма Гёргеса приобретает вид, изображенный на фиг. 136.

Если же при переключении ступеней пускового реостата магнитный поток двигателя остается постоянным, как это имеет место в шунтовых двигателях, то этот случай можно рассматривать как процесс пуска в ход сериесного двигателя с весьма насыщенной магнитной системой ($\mu_\rho = 1$). Тогда $J = \infty$ и пусковая диаграмма для шунтового двигателя имеет вид, представленный на фиг. 137.

Пусковая диаграмма Гёргеса, изображенная в общем виде на фиг. 135, применима также и для случая пуска в ход двигателей со смешанным возбуждением; только здесь для построения ее необходимо несколько иначе определить значение J. На фиг. 138 представлена магнитная характеристика для двигателя со смешанным возбуждением.

Пусть

I'_{mn} — ток возбуждения шунтовой обмотки, пересчитанный на силу тока последовательной цепи возбуждения $\left(I'_{mn} = I_{mn}\frac{w_m}{w_s}\right)$.



Фиг. 137.

E_n — напряжение холостого хода, соответствующее току возбуждения I'_{mn} и номинальной скорости вращения.

E_2 — напряжение, наводимое в цепи якоря при действии токов возбуждения I'_{mn} и I_2.

μ_{po} — среднее относительное насыщение, равное $\frac{E_o}{E_2}$, тогда напряжение E, находящееся в пределах между E_n и E_2 и наводимое в цепи якоря двигателя при силе тока I, может быть вычислено по следующей формуле (см. ур. 146):

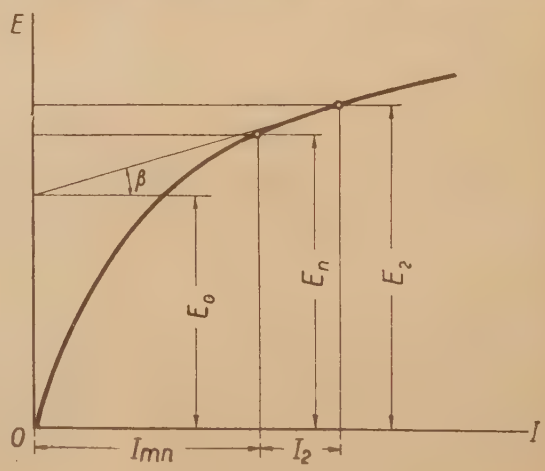
$$E = \mu_{po}E_2 + (1 - \mu_{po})E_2\frac{I_{mn}' + I}{I_{mn}' + I_2}.$$

Обычно ампервитки возбуждения сериесной обмотки выражаются в процентах от общих ампервитков возбуждения; если в соответствии с этим представить

$$I_2 = H(I'_{mn} + I_2),$$

то предыдущее выражение для E после замены в нем I_{mn}' посредством $I_2\frac{(H-1)}{H}$ приобретает следующий вид:

$$\frac{E}{E_2} = 1 - H(1 - \mu_{po}) + (1 - \mu_{po})H\frac{I}{I_2}.$$



Фиг. 138.

Если обозначить посредством

$$\mu_p = 1 - H(1 - \mu_{oo}),$$

то для E получается выражение одинаковое с ранее выведенным (см. форм. 147), а именно:

$$E = \mu_\rho E_2 + (1 - \mu_\rho) E_2 \frac{I}{I_2}$$

и

$$\frac{E}{E_k} = \frac{\omega}{\omega_s}\left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right] = \frac{\omega}{\omega_s}\mu_\rho\left[1 + \frac{I}{I}\right].$$

§ 42. Определение числа ступеней и их сопротивлений. — *a.* Аналитический способ Яссе (Jasse). — Из рассмотрения фиг. 135 легко установить, что при переходе с одной ступени на другую наводимые в этот период электродвижущие силы имеют одинаковые отношения, т. е.

$$\frac{E'_{\nu-1}}{E_{\nu-1}} = \frac{\overline{C'C_{\nu-1}}}{\overline{CC_{\nu-1}}} = \frac{\overline{OC'}}{\overline{OC}} = \frac{I_2 + J}{I_1 + J} = \frac{I_2 + J}{I_2/\lambda + J} = \frac{\lambda(I_2 + J)}{I_2 + \lambda J}.$$

Если это отношение обозначить посредством ε и принять во внимание, что

$$J = \frac{\mu_\rho}{1 - \mu_\rho} I_2 \quad \text{и} \quad \frac{E}{E_k} = \frac{\omega}{\omega_s}\left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right],$$

то для момента переключения, т. е. при изменении силы тока с I_1 до I_2 при постоянной угловой скорости ω, получается:

$$\varepsilon = \frac{E'_{\nu-1}}{E_{\nu-1}} = \frac{E'_\nu}{E_\nu} = \frac{[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)]}{\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)1/\lambda} = \frac{\lambda}{1 + (\lambda - 1)\mu_\rho} \qquad 149$$

и

$$\frac{E'_{\nu-1}}{E_k} = \frac{\omega_{\nu-1}}{\omega_s},$$

$$\frac{E_\nu}{E_k} = \frac{\omega_\nu}{\omega_h}\left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)\frac{1}{\lambda}\right] = \frac{\omega_\nu}{\omega_s}\left[\frac{\lambda\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)}{\lambda}\right] = \frac{\omega_\nu}{\omega_s}\frac{1}{\varepsilon}.$$

При помощи формулы 145 далее находят:

$$I_2 \cdot R_\nu = E_k - E'_{\nu-1} = E_k - \frac{\omega_{\nu-1}}{\omega_s} E_k = \left(E_k - \frac{\omega_\nu}{\omega_s}\frac{1}{\varepsilon} E_k\right)\lambda \qquad 150$$

$$I_2 \cdot R_{\nu-1} = \left(E_k - \frac{\omega_{\nu-1}}{\omega_s} \cdot \frac{1}{\varepsilon} E_k\right)\lambda. \qquad 150\text{ a}$$

Обозначая далее посредством r_ν сопротивление ν-й ступени реостата, т. е.

$$r_\nu = R_\nu - R_{\nu+1},$$

принимая во внимание, что при неподвижном состоянии якоря все подводимое из сети напряжение уравновешивается омическим падением напряжения при силе тока I_2 так, что

$$E_k = I_2 \cdot R_1,$$

находят на основании уравнений 149 и 150:

$$\frac{R_{\nu-1}-R_\nu}{R_1}=\frac{r_{\nu-1}}{R_1}=\frac{\lambda}{\varepsilon}\,\frac{\omega_\nu-\omega_{\nu-1}}{\omega_s}, \qquad 151$$

$$\frac{\omega_{\nu-1}}{\omega_s}=\frac{\lambda}{\varepsilon}\,\frac{\omega_\nu}{\omega_s}-\lambda+1. \qquad 152$$

На основании тех же уравнений справедливо также:

$$\frac{R_\nu-R_{\nu+1}}{R_1}=\frac{r_\nu}{R_1}=\frac{\lambda}{\varepsilon}\,\frac{\omega_{\nu+1}-\omega}{\omega_s} \qquad 151a$$

и

$$\frac{\omega_\nu}{\omega_s}=\frac{\lambda}{\varepsilon}\,\frac{\omega_{\nu+1}}{\omega_s}-\lambda+1. \qquad 152a$$

Отсюда получается, что

$$\frac{\omega_\nu-\omega_{\nu-1}}{\omega_{\nu+1}-\omega_\nu}=\frac{\lambda}{\varepsilon}, \qquad 153$$

и

$$\frac{r_{\nu-1}}{r_\nu}=\frac{\lambda}{\varepsilon}. \qquad 154$$

Последние уравнения показывают, что сопротивление отдельных ступеней, а также и разности скоростей вращения для каждой ступени возрастают в геометрической прогрессии.

Для практики большой интерес представляет знание сопротивлений реостата для каждого положения подвижного контакта. Для ν-го положения сопротивление реостата равняется:

$$R_\nu=R_{\nu+1}+r_\nu=R_{\nu+2}+r_{\nu+1}+r_\nu=R_{\nu+3}+r_{\nu+2}+r_{\nu+1}+r_\nu=$$

$$=\ .\ .\ .=R_{\nu+\varkappa}+\sum_{m=\nu}^{\nu+\varkappa-1} r_\mu,$$

при $\varkappa=m-\nu$ получается

$$R_\nu=R_m+\sum_{m=\nu}^{m-1} r_\mu,$$

где m — общее число ступеней, считая сопротивление якоря мотора,

$m-1$ — общее число ступеней реостата,

R_m — сопротивление цепи якоря для последнего m-го положения пусковой рукоятки, т. е. сопротивление якоря мотора.

Так как

$$r_\nu=\frac{\lambda}{\varepsilon}\,r_{\nu+1}=\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^2 r_{\nu+2}=\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^3 r_{\nu+3}=\ .\ .\ .=\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^\varkappa r_{\nu+\varkappa};$$

то для $\gamma = m - 1 - \nu$

$$r_\nu = \left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-1-\nu} \cdot r_{m-1}. \qquad 155\,a$$

Последнее равенство, конечно, остается справедливо, если вместо ν подставить μ; в этом случае сопротивление для ν-го положения контакта получается равным:

$$R_\nu = R_m + r_{m-1} \sum_{\mu=\nu}^{m-1} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right).$$

Стоящая в правой части последнего равенства сумма представляет собою сумму членов геометрической прогрессии с знаменателем $\frac{\lambda}{\varepsilon}$ и числом членов $m - \nu$, т. е.

$$\sum_{\mu=\nu}^{m-1} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-1-\mu} = \frac{\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-\nu} - 1}{\frac{\lambda}{\varepsilon} - 1}.$$

Таким образом в окончательном виде получается, что

$$R_\nu = R_m + r_{m-1} \frac{\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-\nu} - 1}{\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right) - 1}. \qquad 155$$

Определение сопротивлений реостата для каждого положения подвижного контакта можно произвести также и относительно наибольшего сопротивления цепи пускового тока. С целью установления связи между R_ν и R_1 и r_ν и R_1 следует воспользоваться уравнением:

$$E_k = E'_{m-1} + I_2 \cdot R_m = \frac{\omega_{m-1}}{\omega_s} E_k = \frac{R_m}{R_1} E_k,$$

откуда получается

$$\frac{\omega_{m-1}}{\omega_s} = 1 - \frac{R_m}{R_1}.$$

Далее из уравнений 151 и 152 следует

$$\frac{R_{m-1} - R_m}{R_1} = \frac{r_{m-1}}{R_1} = \lambda - 1 - \left(\frac{\lambda}{\varepsilon} - 1\right) \frac{\omega_{m-1}}{\omega_s}.$$

Таким образом на основании этих двух последних выражений получается:

$$\frac{r_{m-1}}{R_1} = \lambda - 1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda} - 1\right)\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right) = \frac{\lambda}{\varepsilon}(\varepsilon - 1) + \left(\frac{\lambda}{\varepsilon} - 1\right)\frac{R_m}{R_1}. \qquad 156$$

Подставляя это выражение в уравнение 155, имеют после краткого преобразования:

$$R_\nu = R_1 \frac{\varepsilon - 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} \left[\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-\nu} - 1 \right] + R_m \left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-\nu}.$$

Так как последнее выражение справедливо для любого положения подвижного контакта, то оно может быть написано и для первого положения, т. е. $\nu = 1$ и следовательно $R_\nu = R_1$,

$$R_1 = R_1 \frac{\varepsilon - 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} \left[\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-1} - 1 \right] + R_m \left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-1}.$$

Решая последнее уравнение относительно R_m, получают:

$$R_m = \frac{(\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m - \varepsilon + 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} R_1. \qquad 157\text{a}$$

Если подставить это выражение вместо R_m в предыдущее уравнение и принять во внимание, что $\varepsilon = \frac{\lambda}{1 + (\lambda + 1)\mu}$ (см. ур. 149), имеют в окончательном виде следующее выражение для R_ν

$$\frac{R_\nu}{R_1} = \frac{(\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m - \varepsilon + 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} = \frac{1}{\mu_\rho} \left[\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} - 1 + \mu_\rho \right]. \qquad 157$$

В частном случае, когда двигатель имеет совершенно ненасыщенную систему, т. е. когда $\mu_\rho = 0$, получается:

$$\varepsilon = \frac{E'_{\nu-1}}{E_{\nu-1}} = \frac{E'_\nu}{E_\nu} = \ldots = \frac{\lambda}{1 + (\lambda - 1)\mu_\rho} = \lambda$$

и

$$R_\nu = R_1 [\lambda - (\lambda - 1)\nu].$$

Последняя формула показывает, что при ненасыщенных двигателях сопротивления для отдельных положений подвижного контакта реостата изменяются по арифметическому ряду.

Для сильно насыщенных или шунтовых, когда $\mu_\rho = 1$, имеет место:

$$\varepsilon = \frac{E'_{\nu-1}}{E_{\nu-1}} = \frac{E'_\nu}{E_\nu} = \ldots = 1$$

и

$$R_\nu = R_1 \cdot \lambda^{-\nu+1}.$$

Из последней формулы видно, что числовые значения пусковых сопротивлений для шунтовых двигателей представляют геометрическую прогрессию.

Все вышеприведенные формулы позволяют рассчитать пусковой реостат для заданного двигателя. Для расчета необходимо иметь предварительно следующие данные:

R_m — сопротивление цепи якоря двигателя и соединительных проводов.

E_k — напряжение сети, к которой присоединяется двигатель.

I_2 — допустимый максимальный пусковой ток.

λ — отношение максимального пускового тока к току переключения.

μ_ρ — относительное насыщение магнитной системы двигателя.

Что касается значения величин I_2, λ, то таковые или указываются при задании, или выбираются самим конструктором на основании заданных условий пуска в ход двигателя.

Относительное магнитное насыщение μ_ρ определяется по магнитной характеристике данного двигателя в случае сериесной обмотки возбуждения; в случае же шунтовой — оно всегда равно единице, так как магнитный поток здесь не зависит от силы тока якоря.

Число пусковых ступеней реостата может быть определено следующим образом:

1) на основании известных величин λ и μ_ρ находят:

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{1 + (\lambda - 1)\mu_\rho};$$

2) по заданному значению E_k и I_2 находят наибольшее сопротивление пусковой цепи:

$$R_1 = \frac{E_k}{I_2};$$

3) по найденным ε и R_1 и на основании известного значения λ, пользуясь формулой 157а, определяют число ступеней:

$$\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m = \frac{\frac{R_m}{R_1}\left(1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) + (\varepsilon - 1)}{\lambda - 1},$$

$$m = \frac{\ln\left[\frac{R_m}{R_1}\left(1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) + (\varepsilon - 1)\right] - \ln(\lambda - 1)}{\ln\varepsilon - \ln\lambda}; \qquad 158$$

m — должно быть целым числом; если m не получается целым числом, то необходимо несколько изменить выбранное значение λ так, чтобы в результате m было числом целым.

В некоторых случаях вычисление числа ступеней производится несколько иначе, а именно:

Пусть означают:

j — отношение тока переключения к номинальному току двигателя,

η — коэффициент полезного действия двигателя для номинального режима работы.

Тогда

$$I_1 = j \cdot I_n$$

или

$$\frac{I_2}{\lambda} = j \cdot I_n.$$

Сопротивление R_m цепи якоря и соединительных проводов двигателей может быть принято равным $\frac{2}{3} = \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)$.

Из равенств (см. формулу 145)

$$E_k = E_n + I_n \cdot R_m,$$

и

$$E_k = I_2 \cdot R_1,$$

а также на основании соотношения между I_2 и I_n следует, что

$$\frac{R_m}{R_1} = j \cdot \lambda (1 - \eta). \qquad 159$$

На основании этой и формулы 157а получается:

$$j \cdot \lambda (1 - \eta) = \frac{(\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m - \varepsilon + 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}},$$

откуда

$$\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m = \frac{\varepsilon - 1 + j(\lambda - \varepsilon)(1 - \eta)}{\lambda - 1} \qquad 160$$

или

$$\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m = 1 - \varepsilon \mu_0 [1 - j(1 - \eta)]. \qquad 160\text{а}$$

Для двух крайних случаев, когда

1) $\mu_0 = 0$ (для ненасыщенных сериесных двигателей)

$$\varepsilon = \lambda; \; m = \frac{\lambda}{\lambda - 1}[1 - j(1 - \eta)]; \qquad 161\text{а}$$

2) $\mu_\rho = 1$ (для шунтовых двигателей)

$$\varepsilon = 1;\ \lambda^{-m} = j(1-\eta);\ m = -\frac{\ln(1-\eta)j}{\ln\lambda}. \qquad 161b$$

По найденному значению m и окончательно выбранным величинам λ и ε определяют затем отношение сопротивлений двух соседних ступеней и, следовательно, сопротивления каждой ступени:

$$\frac{r_{\nu-1}}{r_\nu} = \frac{\lambda}{\varepsilon}.$$

Сопротивление последней ступени реостата равняется (см. формулу 156)

$$r_{m-1} = R_1\left[\frac{\lambda}{\varepsilon}(\varepsilon-1) + \left(\frac{\lambda}{\varepsilon}-1\right)\frac{R_m}{R_1}\right].$$

Сопротивления предпоследней и последующих ступеней:

$$\left.\begin{aligned} r_{m-2} &= r_{m-1}\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right) \\ &\cdots\cdots\cdots \\ r_{m-k} &= r_{m-1}\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{\kappa-1} \\ \text{и при } k = m-1 \text{ получается} \\ r_1 &= r_{m-1}\left(\frac{\lambda}{\varepsilon}\right)^{m-2} \end{aligned}\right\} \qquad 162$$

Пример расчета. — Требуется рассчитать ступени реостата для пуска в ход сериесного мотора:

Данные двигателя:

Номинальная мощность $P_n = 25\,kW$.

Поглощаемая мощность $P_1 = 29{,}5\,kW$.

Напряжение сети $E_k = 220\,V$.

Процентная потеря напряжения в обмотке якоря, в обмотке возбуждения, а также в соединительных проводниках $e = 10\,\%$.

Характеристика двигателя представлена на фиг. 139.

Условия пуска в ход:

отношение максимального пускового тока к току переключения

$$\lambda = \frac{I_2}{I_1} = 1{,}25;$$

отношение тока переключения к номинальному току:

$$j = \frac{I_2}{I_n} = 1{,}2;$$

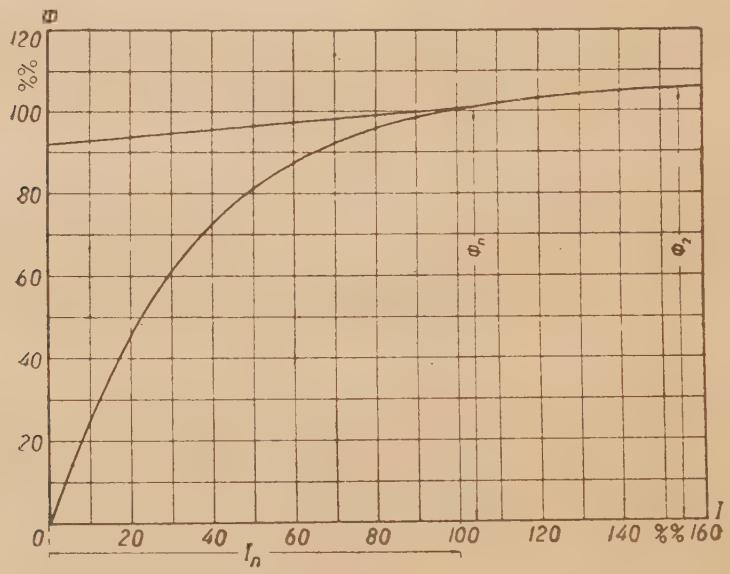
отношение максимального пускового тока к номинальному:

$$j \cdot \lambda = \frac{I_2}{I_n} = 1{,}5;$$

частота пуска в ход $f_h = 4$;

пуск происходит с постоянным нагрузочным моментом ($\alpha = Const$).

Определяются:



Фиг. 139.

номинальный пусковой ток:

$$I_n = \frac{29{,}5 \cdot 1\,000}{220} = 134\ A.$$

Максимальный пусковой ток:

$$I_2 = I_n \cdot j \cdot \lambda = 134 \cdot 1{,}5 = 201\ A.$$

Максимальное сопротивление всей цепи якоря:

$$R_1 = \frac{E_k}{I_2} = \frac{220}{201} = 1{,}094\ \Omega.$$

Сопротивление обмоток якоря и полюсов:

$$R_m = \frac{e \cdot E_k}{I_n\,100} = \frac{102 \cdot 20}{134 \cdot 100} = 0{,}164\ \Omega.$$

Коэффициент относительного насыщения (из характеристики намагничивания двигателя, см. фиг. 139):

$$\mu_p = \frac{\Phi_a}{\Phi_2} = \frac{92}{104,5} = 0,88.$$

Отношение электродвижущих сил при переходе с одного контакта на другой:

$$\varepsilon = \frac{E'_v}{E_v} = \frac{\lambda}{1 + (\lambda - 1)\mu_p} = \frac{1,25}{1 + (1,25 - 1)\,0,88} = 1,025.$$

Общее число ступеней (см. формулу 158):

$$m = \frac{\ln\left[\frac{0,164}{1,094}\left(1 - \frac{1,025}{1,25}\right) + (1,025 - 1)\right] - \ln(1,25 - 1)}{\ln 1,025 - \ln 1,25} = 8,0.$$

Число ступеней пускового реостата:

$$m - 1 = 8,0 - 1,0 = 7,0.$$

Сопротивление последней ступени пускового реостата (см. формулу 156):

$$r_7 = 1,094\left[\frac{1,25}{1,025}(1,025 - 1) + \left(\frac{1,25}{1,025} - 1\right)\frac{0,164}{1,094}\right] = 0,069\,\Omega.$$

Если известно сопротивление последней ступени, то легко уже подсчитать сопротивления и всех остальных ступеней пускового реостата (см. формулу 155 а).

$$r_1 = \left(\frac{1,25}{1,025}\right)^6 0,069 = 0,223\ \Omega$$

$$r_2 = \left(\frac{1,25}{1,025}\right)^5 0,069 = 0,182\ „$$

$$r_3 = \left(\frac{1,25}{1,025}\right)^4 0,069 = 0,151\ „$$

$$r_4 = \left(\frac{1,25}{1,025}\right)^3 0,069 = 0,124\ „$$

$$r_5 = \left(\frac{1,25}{1,025}\right)^2 0,069 = 0,1025\ „$$

$$r_6 = \left(\frac{1,25}{1,025}\right) 0,069 = 0,084\ „$$

$$r_7 = \qquad = 0,069\ „$$

$$r_8 = R_m \qquad = 0,164\ „$$

$$\text{Всего} = 1,0995\ \Omega.$$

Для проверки правильности расчета всегда следует брать сумму сопротивлений отдельных ступеней, что должно представлять максимальное сопротивление R_1. Если же получается несколько отличная величина, то пересчитывается соответственно и максимальный пусковой ток; т. е.

$$I_2 = \frac{E_k}{R_1} = \frac{220}{1{,}0995} \cong 200\ A.$$

b. Аналитический способ Гунниуса. — Определение как числа ступеней реостата, так и сопротивлений отдельных ступеней его легко произвести и другим, более простым аналитическим методом, предложенным проф. Гунниусом (Hunnius) и состоящим в следующем:

Пусть $R_1, R_2 \ldots R_m$ сопротивления реостата и цепи якоря двигателя (фиг. 131). Когда подвижной контакт стоит в первом положении и двигатель еще находится в неподвижном состоянии, общее сопротивление цепи якоря и реостата может быть определено по формуле:

$$R_1 = \frac{E_k}{I_2}.$$

Как только двигатель приходит во вращение, в цепи якоря наводится электродвижущая сила E_a, и тогда

$$E_k = I \cdot R_1 + E_a,$$

причем

$$E_a = \frac{p}{a}\frac{n}{60} N \cdot \Phi\, 10^{-8} = \frac{p}{a}\frac{\omega}{2\pi} N \cdot \Phi\, 10^{-8},$$

где: N — число проводов обмотки якоря,

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря,

p — число пар полюсов,

n — число оборотов двигателя в минуту,

ω — угловая скорость.

В момент, соответствующий началу перехода подвижного контакта из первого положения во второе, двигатель развивает угловую скорость вращения ω_1, равную:

$$\omega_1 = \frac{10^8\, 2\pi a (E_k - I_1 \cdot R_1)}{N \cdot p \cdot \Phi_1} = \frac{(E_k - I_1 \cdot R_1) I_1}{D_1},$$

где D_1 — крутящий момент, развиваемый двигателем.

Для начального момента нахождения подвижного контакта во втором положении справедливы также следующие равенства:

$$\omega_1 = \frac{(E_k - I_2 R_2) I_2}{D_2} \qquad 163$$

и

$$\Phi_2 = \frac{(E_k - I_2 \cdot R_2)\,\Phi_1}{(E_k - I_1 R_1)}.$$

Отсюда получается:

$$R_2 = \frac{E_k}{I_2} - \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \cdot \frac{E_k - I_1 \cdot R_1}{I_2},$$

или

$$R_2 = R_1 \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \qquad 164$$

где

$$\varepsilon = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}.$$

Когда ток в цепи якоря достигает значения I_1 при нахождении контакта во втором положении, двигатель начинает развивать скорость:

$$\omega_2 = \frac{(E_k - I_1 \cdot R_2)\, I_1}{D_1}.$$

При включении третьей ступени

$$R_3 = \frac{E_k}{I_2} - \frac{\Phi_2}{\Phi_1} \frac{(E_k - I_1 \cdot R_2)}{I_2} = R_1 - \varepsilon \left(R_1 - \frac{R_2}{\lambda}\right),$$

или

$$R_3 = R_1 \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\lambda} - \frac{\varepsilon^2}{\lambda} + \frac{\varepsilon^2}{\lambda^2}\right)$$

и

$$\omega_3 = \frac{(E_k - I_1 \cdot R_3)\, I_1}{D_1}.$$

Аналогично этим выводам для ν-го контакта имеется

$$R_\nu = R_1 \left(1 - \varepsilon + \frac{\varepsilon}{\lambda} - \frac{\varepsilon^2}{\lambda} + \frac{\varepsilon^2}{\lambda^2} - \ldots - \frac{\varepsilon^{\nu-1}}{\lambda^{\nu-2}} + \frac{\varepsilon^{\nu-1}}{\lambda^{\nu-1}}\right); \qquad 165$$

последнее уравнение можно представить в виде

$$\frac{R_\nu}{R_1} = 1 - \left[\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) + \left(\varepsilon - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right)\frac{\varepsilon}{\lambda} + \ldots + \left(\varepsilon - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right)\frac{\varepsilon^{\nu-2}}{\lambda^{\nu-2}}\right];$$

если вынести $\left(\varepsilon - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right)$ за скобки, то выражение, стоящее в квадратных скобках, представляет собою простую геометрическую прогрессию, и тогда можно написать

$$\frac{R_\nu}{R_1} = 1 - \left(\varepsilon - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1}}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}. \qquad 166$$

Из последней формулы следует, что для

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \varepsilon = 1,$$

т. е. для шунтовых двигателей

$$\frac{R_\nu}{R_1} = \frac{1}{\lambda^{\nu-1}}, \text{ или } R_\nu = R_1 \lambda^{-\nu+1}.$$

Из формул 164 и 165 получается, что

$$\frac{R_{\nu-1} - R_\nu}{R_1 - R_2} = \frac{r_{\nu-1}}{r_1} = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-2}; \qquad 167$$

формулы 163 и 167 дают

$$\frac{\omega_\nu - \omega_{\nu-1}}{\omega_2 - \omega_1} = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-2}, \qquad 168$$

а на основании формул 168, 163 и 166 имеется

$$\frac{\omega_\nu}{\omega_1} = \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1}}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}, \qquad 168a$$

кроме того легко понять, что

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{I_2 \cdot \Phi_2}{I_1 \cdot \Phi_1} = \varepsilon \cdot \lambda. \qquad 168b$$

Если известна магнитная характеристика двигателя, т. е. $\Phi = f(I)$, то определение коэффициента $\varepsilon = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}$ для заданного соотношения $\lambda = \frac{I_2}{I_1}$ не представляет затруднений.

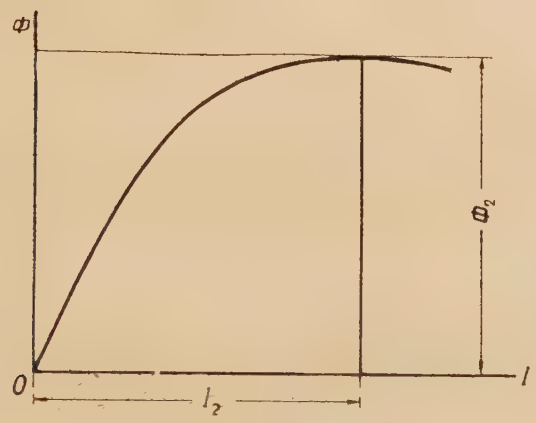
Как известно, форма кривой магнитной характеристики $\Phi = f(I)$ двигателя постоянного тока зависит от устройства полюсных наконечников и насыщения магнитной системы; с целью упрощения вычислений эту зависимость можно графически представить кривой, более или менее приближающейся к параболе, которая имеет вершину, лежащую на ординате, соответствующей силе тока I_2, а ветвь, проходящую через начало координат (см. фиг. 140).

При таких допущениях кривая выражается уравнением:

$$\Phi = 2\,\frac{\Phi_2}{I_2}\left(I - \frac{I^2}{2I_2}\right),$$

на основании этого:

$$\varepsilon = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{I_2 - \frac{I_2^2}{2I_2}}{I_1 - \frac{I_1^2}{2I_2}} = \frac{1}{2\left[\frac{1}{\lambda} - \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2\right]}.$$



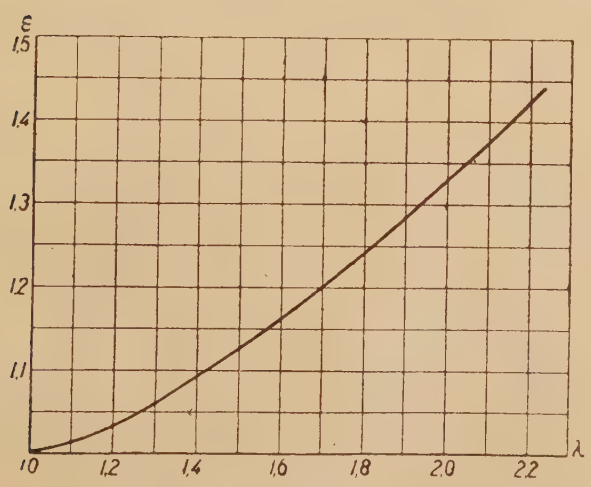
Фиг. 140.

или

$$\varepsilon = \frac{\lambda^2}{2\lambda - 1}. \qquad 169$$

Тогда формула 166 приобретает вид

$$\frac{R_y}{R_1} = 1 - \lambda + \frac{\lambda^y}{(2\lambda - 1)^{y-1}}, \qquad 170$$



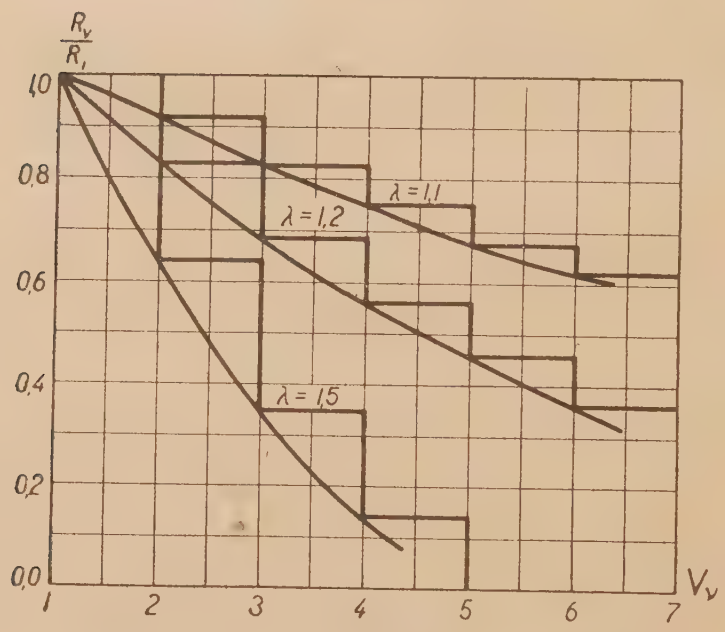
Фиг. 141.

отсюда для $\nu = m$

$$\left(\frac{\lambda}{2\lambda - 1}\right)^{m-1} = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{R_m}{R_1} + \lambda - 1\right) = 1 - \frac{1}{\lambda}\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right),$$

и число ступеней сопротивления цепи якоря равняется

$$m = \frac{\ln\left[1 - \frac{1}{\lambda}\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right)\right]}{\ln\left(\frac{\lambda}{2\lambda - 1}\right)} \qquad 170a$$



Фиг. 142.

Для удобства вычислений приведены на диаграмме фиг. 141 значения ε в зависимости от λ, а на диаграмме фиг. 142 дано семейство кривых:

$$\frac{R_\nu}{R_1} = f(m)$$

для различных значений λ.

Пример расчета. Требуется рассчитать реостат для двигателя предыдущего примера.

Данные условия пуска в ход двигателя остаются теми же, т. е.

$$\lambda = 1{,}25\,; \quad j = 1{,}20\,; \quad j \cdot \lambda = 1{,}5.$$

Согласно формуле 170 a общее число пусковых ступеней равняется:

$$m = \frac{\ln\left[1 - \frac{1}{1{,}25}\left(1 - \frac{0{,}164}{1{,}094}\right)\right]}{\ln\left(\frac{1{,}25}{2 \cdot 1{,}25 - 1}\right)} + 1 \cong 6 + 1 = 7.$$

Коэффициент ε определяется из соотношения (см. форм. 169):

$$\varepsilon = \frac{1{,}25^2}{2 \cdot 1{,}25 - 1} = 1{,}04.$$

Сопротивление пусковой цепи, при нахождении подвижного контакта во втором положении, равно (см. форм. 170):

$$R_2 = R_1\left[1 - \lambda + \frac{\lambda^2}{2\lambda - 1}\right] = 1{,}094\left[1 - 1{,}25 + \frac{1{,}25^2}{2 \cdot 1{,}25 - 1}\right] = 0{,}862\,\Omega.$$

Сопротивление первой ступени пускового реостата равно тогда:

$$r_1 = R_1 - R_2 = 1{,}094 - 0{,}862 = 0{,}232\,\Omega.$$

По формуле 167 является возможным теперь подсчитать сопротивление и всех остальных ступеней реостата, т. е.

$$r_2 = \left(\frac{1{,}04}{1{,}25}\right) 0{,}232 = 0{,}193\,\Omega$$

$$r_3 = \left(\frac{1{,}04}{1{,}25}\right)^2 0{,}232 = 0{,}162\ „$$

$$r_4 = \left(\frac{1{,}04}{1{,}25}\right)^3 0{,}232 = 0{,}134\ „$$

$$r_5 = \left(\frac{1{,}04}{1{,}25}\right)^4 0{,}232 = 0{,}113\ „$$

$$r_6 = \left(\frac{1{,}04}{1{,}25}\right)^5 0{,}232 = 0{,}094\ „$$

$$r_7 = r_m = \ldots = 0{,}164\ „$$

$$r_1 = \ldots\ldots = 0{,}232\ „$$

$$\text{Всего} = 1{,}092\,\Omega.$$

c. Аналитический метод автора. — Ранее было выведено, что (см. форм. 166, 168 a, 168 b)

$$\frac{R_\nu}{R_1} = 1 - \left(\varepsilon - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right) \cdot \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu - 1}}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}},$$

$$\frac{\omega_\nu}{\omega_1} = \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu - 1}}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}.$$

и

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{\Phi_2 \cdot I_2}{\Phi_1 \cdot I_1} = \varepsilon \cdot \lambda.$$

Для установления аналитической зависимости между I и Φ в сериесных двигателях постоянного тока Яссе делает предположение, что при изменениях силы тока якоря в пределах I до I_2 магнитный поток представляет прямолинейную функцию тока I, и выражает эту зависимость так:

$$\varepsilon = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{E'_{\nu}}{E_{\nu}} = \frac{E'_{\nu-1}}{E_{\nu-1}} = \ldots = \frac{\lambda}{1 + (\lambda - 1)\mu_{\rho}},$$

где μ_{ρ} — так называемый коэффициент относительного насыщения.

Такое положение справедливо лишь для тех случаев, когда двигатель работает в насыщенном или совершенно ненасыщенном состоянии, когда точки, характеризующиеся координатами Φ_1/I_1 и Φ_2/I_2, лежат за коленом, или на начальной прямолинейной части кривой намагничивания.

Между тем в большинстве случаев нормальные двигатели постоянного тока работают при полунасыщенном состоянии магнитной системы, поэтому коэффициент μ_{ρ} не остается постоянным при изменениях силы тока в пределах от I_1 до I_2.

Гунниус для упрощения расчетов сделал допущение, что кривая намагничивания представляет параболу, вершина которой лежит на ординате, соответствующей силе тока I_2, а ветвь проходит через начало координат (см. фиг. 140). При таком допущении кривую намагничивания можно выразить уравнением:

$$\Phi = 2 \cdot \frac{\Phi_2}{I_2} \cdot \left(I - \frac{I_2}{2I_2}\right);$$

на основании этого получается, что

$$\varepsilon = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{\lambda^2}{2\lambda - 1}.$$

Однако при таком допущении результаты определения числа ступеней получаются приближенными; кроме того, в выражении для не участвует совершенно коэффициент μ_{ρ}, учитывающий магнитное состояние машины, когда через обмотку возбуждения проходит ток I_1 или I_2.

Для получения более точных результатов автор предлагает видоизменить метод Гунниуса следующим образом: кривая намагничивания

представляется в виде параболы, ветвь которой проходит через начало координат и точки, характеризующиеся координатами Φ_1/I_1 и Φ_2/I_2 (см. фиг. 143), причем касательная, проведенная к этой кривой в точке Φ_2/I_2, должна определять заданный коэффициент насыщения μ_ρ.

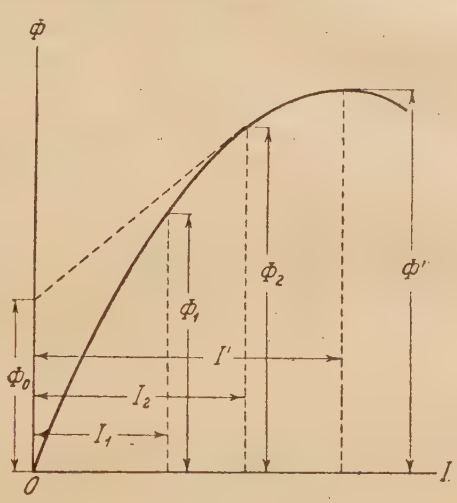
При таком допущении кривая намагничивания выражается уравнением:

$$(I' - I)^2 = 2p \cdot (\Phi' - \Phi),$$

где p — параметр параболы.

С целью определения p, I' и Φ' принимают, что

$$\Phi = \Phi_1 \text{ и } \Phi = \Phi_2,$$



Фиг. 143.

а также

$$\mu_\rho = \frac{\Phi_2 - \operatorname{tg}\alpha \cdot I_2}{\Phi_2} = \frac{\Phi_2 - \frac{I' - I_2}{p} \cdot I_2}{\Phi_2},$$

отсюда получается:

$$p = \frac{I' - I_2}{\Phi_2} \cdot \frac{I_2}{1 - \mu_\rho},$$

$$I' = \frac{1 + \mu_\rho}{2\mu_\rho} \cdot I_2$$

и

$$\varepsilon = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{\lambda^2}{\lambda + \mu_\rho(\lambda - 1)}. \qquad 171$$

На фиг. 144 представлены кривые, изображающие зависимость ε от μ_ρ для различных λ.

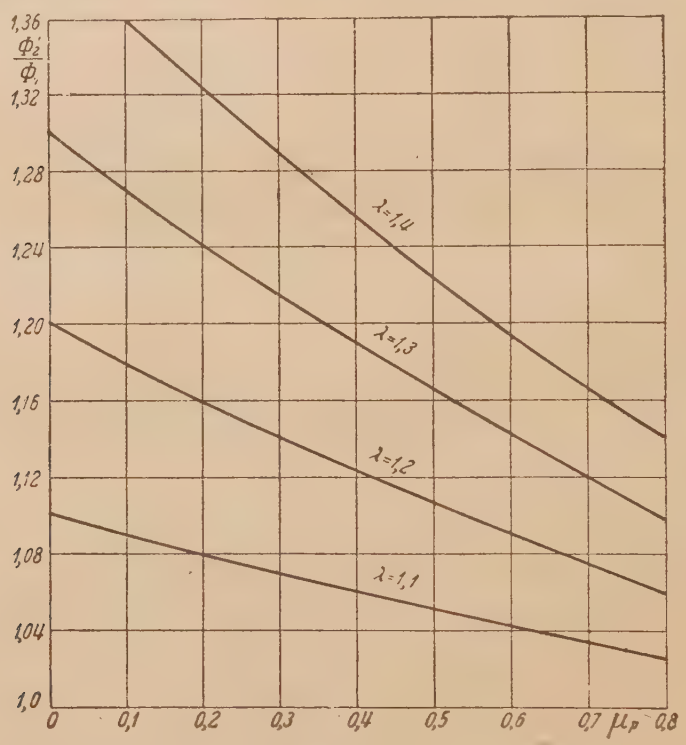
В пределах изменений λ от 1,1 до 1,4 и μ_ρ от 0 до 0,8 зависимость ε от μ_ρ и λ можно выразить более простой формулой, а именно:

$$\varepsilon = \lambda - (\lambda - 1)\,\mu_\rho = \mu_\rho + (1 - \mu_\rho)\,\lambda. \qquad 171a$$

Вычислив ε по заданным μ_ρ и λ, производят дальнейшие расчеты по определению числа ступеней, сопротивлений ступеней по ранее приведенным формулам.

d. Номографический метод расчета сопротивлений пускового реостата. — Как видно из изложенных выше методов,

расчет сопротивлений отдельных ступеней реостата является довольно сложным, особенно тогда, когда по заданным условиям пуска получаются дробные числа ступеней сопротивления. Подбор же каких-либо других условий для округления числа ступеней до ближайшего целого числа представляет большие затруднения, особенно в общем случае, когда двигатель должен работать за коленом магнитной характеристики. Кроме того, аналитические методы обладают тем неудобством,



Фиг. 144.

что требуют для каждого частного случая производства целого ряда арифметических выкладок и вычерчиваний.

Приводимый ниже номографический метод, предложенный Доувером (Dover), дает возможность не прибегать всякий раз к числовым подсчетам; раз вычисленные и нанесенные в виде кривых основные коэффициенты для различного числа ступеней пускового реостата и процентного падения напряжения в двигателе при номинальной нагрузке могут быть использованы для любого случая.

Кривые коэффициентов лучше наносить на прозрачной бумаге, чтобы при наложении диаграммы на магнитную характеристику двигателя можно было бы непосредственно наблюдать точки пересечения

этой кривой с кривыми определяющих коэффициентов. Этот метод особенно удобен для специальных отделов проектирования пусковых реостатов, так как диаграммы коэффициентов могут быть применены ко всем типам двигателей постоянного тока.

Сначала лучше рассмотреть, как более простой случай, расчет пускового реостата для шунтового двигателя, а затем уже общие положения относительно сериесных моторов.

Если шунтовой двигатель пускается в ход обыкновенным введением в цепь якоря сопротивления, то поток можно положить постоянным в течение всего времени пуска, если напряжение на месте потребления не меняется.

Обозначая, как ранее, посредством

E_k — напряжение сети на месте потребления,

I_2 — максимальный пусковой ток,

I_1 — ток переключения,

$R_1, R_2, \ldots R_{m-1}, R_m$ — сопротивления цепи тока якоря при различных, соответствующих положениях подвижного контакта,

R_m — сопротивление якоря,

тогд общее сопротивление цепи реостата можно определить как:

$$R_1 = \frac{E_k}{I_2}.$$

Когда ток якоря спадает до своего низшего значения I_1, сопротивление пускового реостата переключается с R_1 на R_2, причем электродвижущая сила якоря в момент переключения сохраняет свое значение благодаря постоянству магнитного потока:

$$E_1 = E_k - I_1 \cdot R_1 = E_k - I_2 \cdot R_2$$

отсюда

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 \qquad 172a$$

или

$$R_2 = \frac{I_1}{I_2} R_1 = \frac{R_1}{\lambda}$$

где $\lambda = \frac{I_2}{I_1}$ (коэффициент λ может быть отнесен к основным определяющим коэффициентам, так как он влияет на величину и общее число ступений сопротивления).

Далее по аналогии

$$R_3 = \frac{I_1}{I_2} R_2 = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2 R_1 = \frac{R_1}{\lambda_2} \qquad 172b$$

и

$$R_{m-1} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right) R_{m-2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^{m-2} R_1 = \frac{R_1}{\lambda^{m-2}}. \qquad 172c$$

Когда последняя ступень пускового реостата выключается, имеет место равенство:

$$E_{m-1} = E_k - I_1 \cdot R_{m-1} = E_k - I_2 \cdot R_m,$$

где

$$R_m = \left(\frac{I_1}{I_2}\right) R_{m-1} = \frac{R_1}{\lambda^{m-1}},$$

отсюда

$$\frac{R_m}{R_1} = \lambda^{-m+1}. \qquad 173$$

Сопротивление R_m может быть выражено в зависимости от падения напряжения в якоре двигателя при номинальной силе тока I_n так:

$$\frac{R_m}{R_1} = \frac{\frac{e}{I_n}}{\frac{E_k}{I_2}} = \frac{e}{E_k} \cdot \frac{I_2}{I_n}. \qquad 174$$

Отсюда на основании уравнения 173 следует:

$$\lambda = \sqrt[m-1]{\frac{E_k}{e}\frac{I_n}{I_2}},$$

где e есть внутреннее падение напряжения в якоре двигателя при номинальной силе тока I_n.

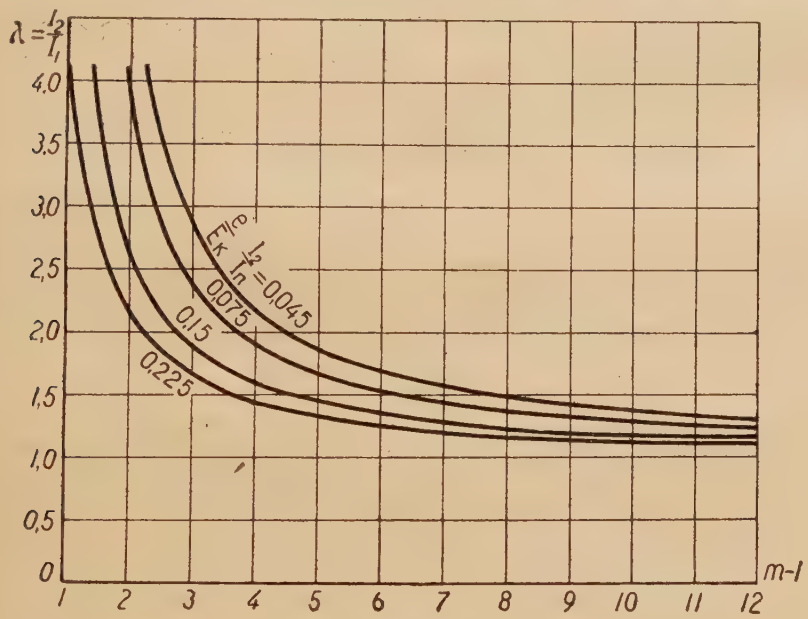
При выбранных определенных значениях для e и $\frac{I_2}{I_n}$ можно подсчитать величины λ для различных чисел ступеней сопротивления пускового реостата $m-1$.

Результаты подсчета приведены на фиг. 145, которая дает кривые для значений $\frac{I_2}{I_n} = 1{,}5$ и $\frac{e}{E_k} = 3$, 5, 10 и 15 процентам. Таким образом, задаваясь этими величинами, можно по кривым фиг. 145 найти соответствующий коэффициент λ и легко подсчитать сопротивление реостата при различных положениях подвижного контакта или сопротивления отдельных ступеней по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned}
r_1 &= R_1 - R_2 = R_1 - \frac{R_1}{\lambda} = R_1\left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) \\
r_2 &= R_2 - R_3 = \frac{R_1}{\lambda} - \frac{R_1}{\lambda^2} = R_1 \frac{1 - \frac{1}{\lambda}}{\lambda} = r_1 \frac{1}{\lambda} \\
r_3 &= R_3 - R_4 = R_1 \frac{1 - \frac{1}{\lambda}}{\lambda^2} = r_1 \left(\frac{1}{\lambda}\right) \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
r_{m-1} &= R_{m-1} - R_m = R_1 \frac{1 - \frac{1}{\lambda}}{\lambda^{m-2}} = r_1 \left(\frac{1}{\lambda}\right)^{m-2}.
\end{aligned}\right\} \qquad 175$$

На фиг. 145 приведены только четыре кривых $\lambda = f\ (m-1)$; но в случае надобности можно такого рода диаграмму расширить до любого числа значений $\frac{e}{E_k} \cdot \frac{I_2}{I_n}$, а также и продлить на большее число ступеней $(m-1)$.

В случае сериесных двигателей налагается еще дополнительное условие, что с изменением тока изменяется и магнитный поток. Если обозначить посредством Φ_2 и Φ_1 потоки, соответствующие силам тока



Фиг. 145.

I_2, I_1, то, пренебрегая действием электродвижущей силы самоиндукции, можно написать уравнения для перехода подвижного контакта с первой ступени на вторую:

$$k \cdot \Phi_2 = E_k - I_1 R_1 \text{ и } k \cdot \Phi_2 = E_k - I_2 \cdot R_2.$$

откуда

$$\frac{k\Phi_1}{k\Phi_2} = \frac{E_k - I_1 \cdot R_1}{E_k - I_2 \cdot R_2}$$

или так как k есть величина постоянная для данной машины, то

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{E_k - I_1 \cdot R_1}{E_k - I_2 \cdot R_2},$$

и вообще $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = \frac{E_k - I_1 \cdot R_1}{E_k - I_2 \cdot R_2} = \frac{E_k - I_1 \cdot R_2}{E_k - I_2 \cdot R_3} = \ldots = \frac{E_k - I_1 \cdot R_{m-1}}{E_k - I_2 \cdot R_m}$, 176

где R_m — сопротивление якоря и сериесной обмотки возбуждения двигателя.

Деля далее числителя последнего выражения на I_1, а знаменателя на I_2, получают:

$$\frac{\Phi_1 I_2}{\Phi_2 I_1} = \frac{\frac{E_k}{I_1} - R_1}{\frac{E_k}{I_2} - R_2} = \frac{\frac{E_k}{I_1} - R_2}{\frac{E_k}{I_2} - R_3} = \ldots = \frac{\frac{E_k}{I_1} - R_{m-1}}{\frac{E_k}{I_2} - R_m}.$$

Здесь $\frac{E_k}{I_2} = R_1$; отношение $\frac{E_k}{I_1}$ может быть обозначено посредством R_o, которое представляет собою общее сопротивление цепи реостата и якоря, необходимое для получения тока I_1, когда скорость вращения якоря равна нулю $\left(R_o = R_1 \frac{I_2}{I_1} = R_1 \cdot \lambda\right)$.

Отсюда, если обозначить посредством ϕ величину

$$\frac{\Phi_2 \cdot I_1}{\Phi_1 \cdot I_2},$$

следует:

$$\frac{1}{\phi} = \frac{R_o - R_1}{R_1 - R_2} = \frac{R_o - R_2}{R_1 - R_3} = \ldots = \frac{R_o - R_{m-1}}{R_m - R_m};$$

откуда

$$r_1 = R_1 - R_2 = \phi(R_o - R_1) = \phi(R_1\lambda - R_1) = R_1\phi(\lambda - 1) \qquad 177$$

$$R_1 - R_3 = \phi(R_o - R_2) = \phi(R_1\lambda - R_2)$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$R_1 - R_m = \phi(R_o - R_{m-1}) = \phi(R_1\lambda - R_{m-1}).$$

Из последних уравнений, при помощи последовательного вычитания и подстановки, следует:

$$r_2 = R_2 - R_3 = \phi[(R_o - R_2) - (R_o - R_1)] = R_1 \cdot \phi^2(\lambda - 1) \qquad 178$$

$$r_3 = R_3 - R_4 = \phi[(R_o - R_3) - (R_o - R_2)] = R_1 \cdot \phi^3(\lambda - 1) \qquad 179$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$

$$r_{m-1} = R_{m-1} - R_m = \phi[(R_o - R_{m-1}) - (R_o - R_{m-2})] =$$

$$= R_1 \cdot \phi^{m-1}(\lambda - 1). \qquad 179a$$

Как видно, в уравнения, определяющие сопротивления ступеней, входят два основных коэффициента ϕ и λ. Величина ϕ зависит от вида кривой характеристики двигателя $\Phi = f(I)$ между значениями пускового тока I_2 и I_1. Очевидно ϕ представляет собою отношение тангенсов углов, которые образуют с осью абсцисс линии, проведен-

ные из начала координат к точкам кривой, соответствующим крайним пределам пускового тока I_2 и I_1, т. е.

$$\phi = \frac{\frac{\Phi_2}{I_2}}{\frac{\Phi_1}{I_1}}.$$

В случае совершенно ненасыщенной магнитной системы: $\phi = 1$, в другом крайнем случае ($\mu_0 = 1$) магнитный поток независим от силы тока якоря:

$$\phi = \frac{1}{\lambda}.$$

Если подставить $\phi = \frac{1}{\lambda}$ в уравнения 177 по 179а, то они получают вид ранее выведенных выражений сопротивлений ступеней реостата для случая шунтового мотора.

Чтобы определить ϕ и λ для какого-либо данного мотора и данных условий пуска, поступают следующим образом:

От сложения уравнений от 177 до 179а получают

$$R_1 - R_m = R_1(\lambda - 1)(\phi + \phi^2 + \ldots + \phi^{m-1}) =$$

$$= R_1(\lambda - 1)\phi\left(\frac{1 - \phi^{m-1}}{1 - \phi}\right),$$

откуда

$$\frac{R_m}{R_1} = 1 - \phi\left(\frac{\lambda - 1}{1 - \phi}\right)\left(1 - \phi^{m-1}\right). \qquad 180$$

С другой стороны $\frac{R_m}{R_1}$ согласно уравнению 174 представляет:

$$\frac{R_m}{R_1} = \frac{e}{E_k} \cdot \frac{I_2}{I_n}.$$

Это при подстановке в уравнение 180 дает:

$$\frac{R_m}{R_1} = 1 - \phi\frac{(\lambda - 1)}{(1 - \phi)}\left(1 - \phi^{m-1}\right) = \frac{e \cdot I_2}{E_k \cdot I_n},$$

откуда

$$\lambda = 1 + \frac{1 - \frac{e}{E_k}\frac{I_2}{I_n}}{\frac{\phi\left(1 - \phi^{m-1}\right)}{(1 - \phi)}}.$$

Задаваясь величиной ϕ, можно вычислить коэффициент λ, соответствующий определенным значениям $m - 1$, $\frac{e}{E_k}$ и $\frac{I_2}{I_n}$.

Для облегчения вычислений в таблице 26 приведены значения знаменателя $\phi(1-\phi^{m-1})/(1-\phi)$ в зависимости от ϕ и $m-1$.

Таблица 26

Значения $\phi(1-\phi^{m-1})/(1-\phi)$ для различных ϕ и $m-1$

$m-1$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ϕ	$\phi(1-\phi^{m-1})/(1-\phi)$										
0,5	0,75	0,875	0,938	—	—	—	—	—	—	—	—
0,6	0,96	1,176	1,306	1,383	1,43	1,458	1,475	1,485	—	—	—
0,7	1,19	1,533	1,773	1,941	2,058	2,141	2,198	2,239	—	—	—
0 75	1,312	1,734	2,051	2,288	2,466	2,6	2,7	2,775	2,831	2,873	2,905
0,8	1,44	1,952	2,362	2,689	2,951	3,161	3,329	3,463	3,57	3,656	3,725
0,85	1,572	2,187	2,708	3,152	3,529	3,845	4,122	4,354	4,551	4,718	4,86
0,9	1,71	2,439	3,095	3,685	4,217	4,695	5,106	5,513	5,862	6,176	6,458
0,95	1,852	2,71	3,524	4,298	5,033	5,732	6,395	7,025	7,624	8,193	8.733
1,0	2,0	3,0	4 0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	9,10	11,0	12,0

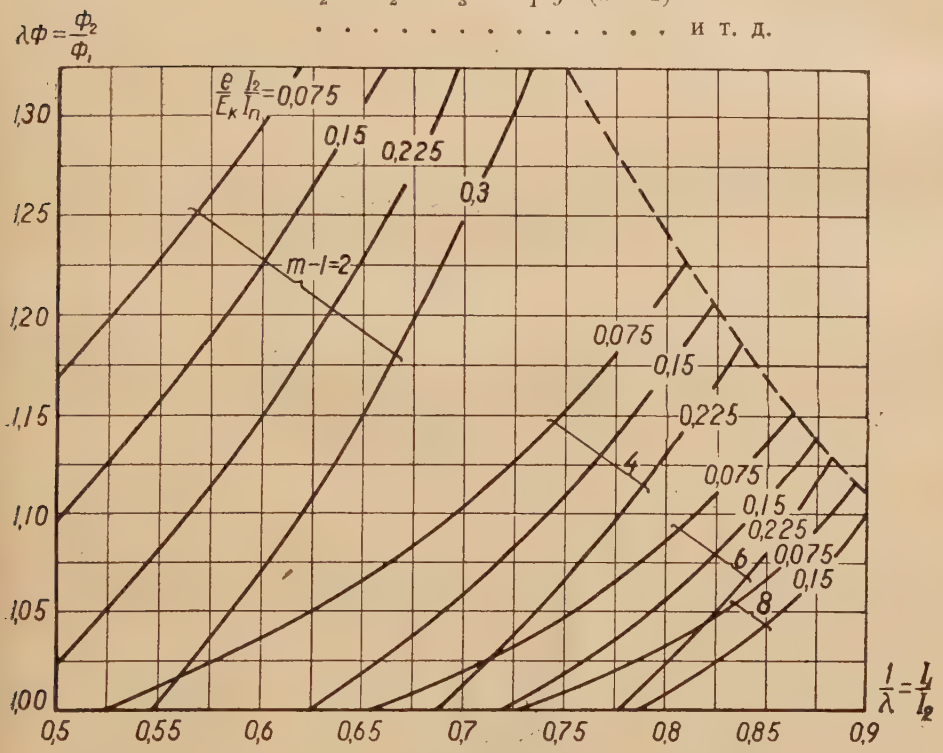
После этого вычисляются значения $\frac{\Phi_2}{\Phi_1}=\lambda\cdot\phi$ и наносятся на диаграмме в зависимости от $\frac{I_1}{I_2}=\frac{1}{\lambda}$ для различных значений $\frac{e\cdot I_2}{E_k\cdot I_n}$ и чисел ступеней сопротивления пускового реостата.

Такие уже вычисленные и построенные кривые представлены на фиг. 146 и 147, которые, во избежание запутанности на чертеже, размещены отдельно для четного и нечетного чисел ступеней.

Такие диаграммы вычерчиваются на прозрачной бумаге и при пользовании накладываются на вычерченную магнитную характеристику двигателя. При этом под магнитной характеристикой здесь понимается зависимость $\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$ от $\frac{I_1}{I_2}$, которую легко получить от обычной характеристики сериесного двигателя $\Phi=f(I)$. Точки пересечения кривых диаграммы с построенной магнитной характеристикой двигателя дают для определенных чисел ступеней и значений $\frac{e\cdot I_2}{E_k\cdot I_n}$ основные определяющие коэффициенты λ и ϕ.

Зная же коэффициенты λ и φ, уже нетрудно подсчитать сопротивления отдельных ступеней пускового реостата по формулам:

$$r_1 = R_1 - R_2 = R_1 \cdot \varphi(\lambda - 1)$$
$$r_2 = R_2 - R_3 = R_1 \cdot \varphi^2(\lambda - 1)$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots \text{ и т. д.}$$



Фиг. 146.

Пример расчета. — Требуется рассчитать сопротивления пускового реостата для сериесного мотора.

Данные мотора и условия пуска сохраняются теми же, что и в предыдущем примере $\left(\frac{I_2}{I_n} = 1{,}5\right)$.

Подсчет характеристики $\frac{\Phi_2}{\Phi_1} = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$ по $\Phi = f(I)$ (см. фиг. 139):

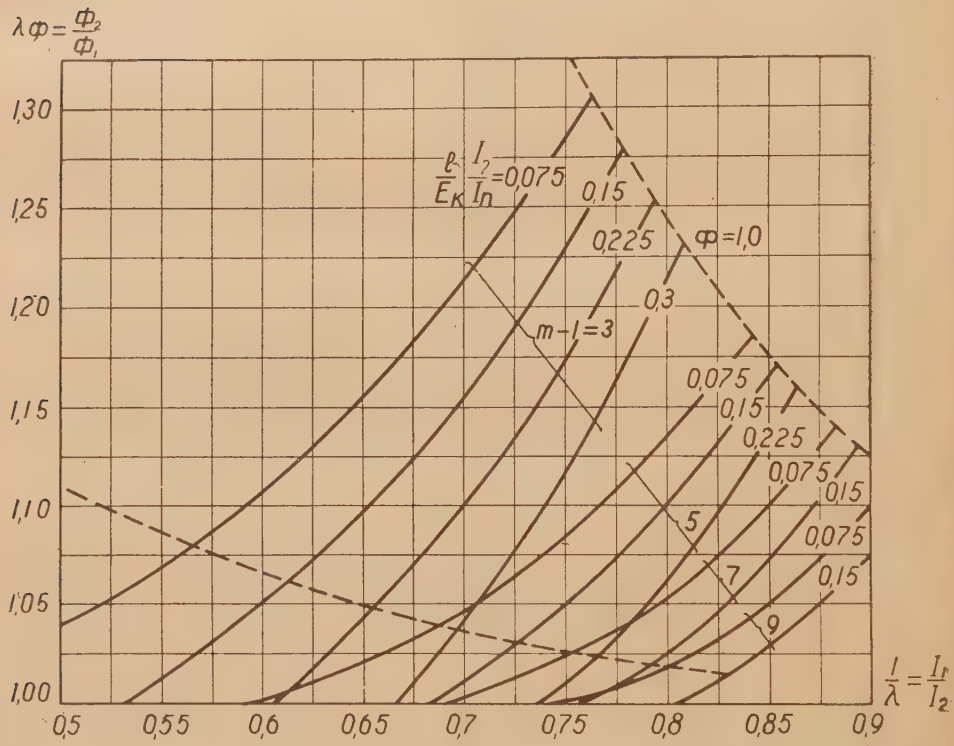
I_2 в % от I_n	150	150	150
I_1 „ „	125	100	75
$\frac{I_1}{I_2}$	0,833	0,666	0,500
Φ_2 в % от Φ_n	104,5	104,5	104,5
Φ_1 „ „	103	100	94
$\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$	1,015	1,045	1,111.

Построенная характеристика нанесена на диаграмму фиг. 147, она дает для

$$\frac{e}{E_k} \cdot \frac{I_2}{I_n} = \frac{22}{220} \cdot \frac{200}{134} = 0{,}149 \text{ и } m - 1 = 7$$

следующие значения для определяющих коэффициентов:

$$\lambda \cdot \phi = 1{,}021; \frac{1}{\lambda} = 0{,}795; \text{ откуда } \lambda = 1{,}26; \ \phi = 0{,}81.$$



Фиг. 147.

Сопротивления ступеней реостата получаются равными:

$$\begin{aligned}
r_1 &= R_1 \cdot \phi(\lambda - 1) = 1{,}094 \cdot 0{,}81 \cdot 0{,}26 = 0{,}2310\ \Omega \\
r_2 &= R_1 \cdot \phi^2(\lambda - 1) = 1{,}094 \cdot (0{,}81)^2 \cdot 0{,}26 = 0{,}1870\ \text{„} \\
r_3 &= \ldots\ldots = 1{,}094 \cdot (0{,}81)^3 \cdot 0{,}26 = 0{,}1510\ \text{„} \\
r_4 &= \ldots\ldots = 1{,}094 \cdot (0{,}81)^4 \cdot 0{,}26 = 0{,}1230\ \text{„} \\
r_5 &= \ldots\ldots = 1{,}094 \cdot (0{,}81)^5 \cdot 0{,}26 = 0{,}0995\ \text{„} \\
r_6 &= \ldots\ldots = (1{,}094) \cdot (0{,}81)^6 \cdot 0{,}26 = 0{,}0805\ \text{„} \\
r_7 &= \ldots\ldots = (1{,}094) \cdot (0{,}81)^7 \cdot 0{,}26 = 0{,}0650\ \text{„} \\
r_8 &= R_m = 0{,}1640\ \text{„} \\
\text{Всего} \ldots &= 1{,}1010\ \Omega.
\end{aligned}$$

Сопротивление реостата $R_1 - R_m = 1{,}101 - 0{,}164 = 0{,}937\ \Omega$. Как видно, этот метод при небольшом сравнительно количестве выкладок дает достаточно точные результаты.

§ 43. Разбег двигателя и его продолжительность.— Разбег двигателя характеризуется математически следующим выражением:

$$\theta \frac{d\omega}{dt} = D - M,$$

где θ — момент инерции вращающихся частей двигателя,
D — момент, развиваемый двигателем,
M — противодействующий или нагрузочный момент
Момент, развиваемый двигателем, равен:

$$D = c \cdot \Phi \cdot I$$

так как (см. ур. 146)

$$\Phi = \Phi_2 \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I}{I_2} \right],$$

то

$$D = c \cdot I \cdot \Phi_2 \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I}{I_2} \right]. \qquad 181$$

Во время пуска в ход момент достигает наибольшего значения при I_2; в этом случае он равен:

$$D_2 = c \cdot I_2 \cdot \Phi_2. \qquad 182$$

Деля оба равенства 181 и 182 друг на друга, находят:

$$\frac{D}{D_2} = \frac{I}{I_2} \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I}{I_2} \right]. \qquad 182a$$

Пусть имеется случай, когда пуск в ход происходит при постоянном нагрузочном моменте, представляющем α-ю часть максимального момента D_2 ($M = \alpha D_2$). По окончании пуска в ход, когда скорость вращения достигает номинальной, нагрузочный момент уравновешивается моментом, развиваемым двигателем, т. е.

$$M = D_n = c \cdot I_n \cdot \Phi_2 \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I_n}{I_2} \right].$$

Таким образом получается, что

$$\alpha = \frac{M}{D_2} = \frac{I_n}{I_2} \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I_n}{I_2} \right] \qquad 183$$

или

$$a = \frac{M}{D_2} = \frac{1}{j \cdot \lambda}\left[\mu_\rho + \frac{1-\mu_\rho}{j \cdot \lambda}\right], \qquad 184$$

так как

$$\frac{I_n}{I_2} = \frac{I_n}{I_1 \cdot \lambda} = \frac{1}{\lambda \cdot j}.$$

Уравнение 184 справедливо для выражения и другого момента, отличающегося от номинального; в таком случае вместо I_n необходимо подставить силу тока I, соответствующую данному моменту.

Для определения продолжительности разбега при постоянном нагрузочном моменте M необходимо заранее знать величины, характеризующие рабочий процесс двигателя при продолжительной работе, как то: E_n, ω_n, η.

Продолжительность времени разбега двигателя, когда подвижной контакт находится в ν-м положении, определяется на основании дифференциального уравнения:

$$t_\nu - t_{\nu-1} = \frac{T_s}{\omega_s}\int_{\omega_{\nu-1}}^{\omega_\nu} \frac{d\omega}{\frac{D}{D_2} - a} = \frac{T_s}{\omega_s}\int_{\omega_{\nu-1}}^{\omega_\nu} \frac{d\omega}{\frac{I}{I_2}\left[\mu_\rho + (1-\mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right] - a}, \qquad 185$$

где T_s — постоянная времени разбега двигателя, равная

$$T_s = \frac{\Theta\omega_s}{D_2} = \frac{2A_s}{P_a}. \qquad 186$$

Для интегрирования уравнения 185 необходимо установить зависимость между силой тока I и угловой скоростью ω; с этой целью пользуются уравнениями 145, из которых получают:

$$\frac{I \cdot R_\nu}{I_2 \cdot R_1} = 1 - \frac{E}{E_k} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s}\left[\mu_\rho + (1-\mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right]. \qquad 187$$

На основании последнего выражения находят:

$$\frac{\omega}{\omega_s} = \frac{1 - \frac{R_\nu \cdot I}{R_1 \cdot I_2}}{\mu_\rho + (1-\mu_\rho)\frac{I}{I_2}}, \qquad 187a$$

дифференцирование этого выражения дает:

$$\frac{1}{\omega_s}\,d\omega = -\frac{1}{I_2}\,dI\,\frac{1 - \mu_\rho + \mu_\rho \cdot \frac{R_\nu}{R_1}}{\left[\mu_\rho + (1-\mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right]^2}.$$

Для определения продолжительности разбега двигателя при постоянном нагрузочном моменте ($\alpha = Const$) подставляют последнее выражение в уравнение 185 и интегрируют полученное вновь выражение, причем принимают, что как только контакт займет ν—1-е положение, угловая скорость $\omega = \omega_{\nu-1}$ и сила тока $I = I_2$, а перед началом перехода на следующую ступень $\omega = \omega_\nu$, и

$$I = I_1 = \frac{I_2}{\lambda};$$

при этих условиях получается:

$$t_\nu - t_{\nu-1} = T_s\left[1 - \mu_\rho + \mu_\rho \frac{R_\nu}{R_1}\right]\vartheta, \qquad 188$$

где

$$\vartheta = \int_{\frac{1}{\lambda}}^{1} \frac{d\frac{I}{I_2}}{\left[\mu_\rho + (1-\mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right]^2\left[\mu_\rho \frac{I}{I_2} + (1-\mu_\rho)\left(\frac{I}{I_2}\right)^2 - \alpha\right]} \qquad 189$$

Интеграл уравнения 189 представляет собою чисто отвлеченное число, зависящее только от трех постоянных λ, μ_ρ и α. Интегрирование выражения 189 дает в общем виде следующее:

$$\vartheta = \frac{1}{2u - \mu_\rho} \cdot \frac{1}{u^2}\left[\left(\frac{u}{u - \mu_\rho}\right)^2 \ln \frac{1 + \varepsilon u - \varepsilon\mu_\rho}{1 + u - \mu_\rho} + \ln \frac{1 - u}{1 - \varepsilon u}\right] - \frac{\varepsilon - 1}{u^2 - \mu_\rho u}, \qquad 189\text{a}$$

где посредством u обозначено:

$$u = \frac{\mu_\rho}{2} + \sqrt{\frac{\mu_\rho^2}{4} + \alpha(1 - \mu_\rho)}.$$

Для наиболее важных предельных случаев ϑ приобретает следующие значения:

1) ненасыщенный сериесный мотор

$$\mu_\rho = 0;\ \varepsilon = \lambda;\ u = \sqrt{\alpha}.$$

$$\vartheta = \alpha^{-3/2}\left[\operatorname{Arc\,tg} h\lambda\sqrt{\alpha} - \operatorname{Arc\,tg} h\sqrt{\alpha}\right] - \frac{\lambda - 1}{\alpha}; \qquad 190$$

a) пуск в ход двигателя вхолостую; $\alpha = 0$.

При $\alpha = 0$ выражение имеет неопределенный вид; после раскрытия неопределенности получается:

$$\vartheta = \frac{1}{3}(\lambda^3 - 1); \qquad 190\text{a}$$

b) пуск в ход двигателя под полной нагрузкой.

Здесь

$$\alpha = \frac{1}{j^2 \cdot \lambda^2}$$

и

$$\vartheta = j^3\lambda^3 \left[\operatorname{Arc\,tg}\, h \frac{1}{j} - \operatorname{Arc\,tg}\, h \frac{1}{j\lambda} \right] - j^2\lambda^2(\lambda - 1); \qquad 190\,b$$

2) шунтовой двигатель

$$\mu_\rho = 1;\ \varepsilon = 1;\ u = 1.$$

В этом случае уравнение приобретает также неопределенный вид; для определения постоянной ϑ производят интегрирование уравнения 189, которое дает в результате:

$$\vartheta = \ln \frac{1 - \alpha}{1/\lambda - \alpha}; \qquad 191$$

a) пуск в ход двигателя вхолостую.

Здесь $\alpha = 0$

и $\vartheta = \ln \lambda;$

b) пуск в ход двигателя под полной нагрузкой.

В этом случае

$$\alpha = \frac{1}{j \cdot \lambda}$$

и

$$\vartheta = \ln \frac{\lambda \cdot j - 1}{j - 1}.$$

Общее выражение постоянной ϑ для случая пуска в ход двигателя вхолостую имеет следующий вид:

$$\vartheta = \frac{1}{\mu_\rho^3} \ln \frac{1 - \mu_\rho}{1 - \varepsilon\mu_\rho} - \frac{\varepsilon - 1}{\mu_\rho^2} \left[1 - \frac{\mu_\rho}{2} (\varepsilon + 1) \right]. \qquad 192$$

Для практического применения рекомендуется заранее вычислить величину ϑ для определенных соотношений μ_ρ, λ и α и построить кривые $\vartheta = f(\alpha)$. Необходимо обратить внимание, что формулы 189—192 пригодны лишь для случаев, когда пуск в ход двигателя производится под постоянной нагрузкой, т. е. для $\alpha = Const$. Если же нагрузочный момент двигателя изменяется со скоростью, то постоянная ϑ имеет для каждой ступени различные значения. В этом случае для интегрирования выражения 189 более удобным является применение графического метода, который излагается в следующем параграфе.

Главным основанием для определения времени пуска в ход является уравнение 188; если же желательно определить продолжительность включения реостата для различных положений подвижного контакта от начала пуска в ход, то поступают аналогично решению задачи в отношении R_ν (см. ур. 151 и 154) и тогда получают:

$$t_\nu = t_{\nu-\mu} + \mu(1-\mu_\rho)\vartheta + T_s \cdot \mu_\rho \cdot \vartheta \sum_{\varkappa=0}^{\mu=1} \frac{R_{\nu-\varkappa}}{R_1}.$$

Принимая $\mu = \nu$ и считая за начало счета времени момент включения первой ступени, имеют:

$$t_0 = 0,$$

и

$$\frac{t_\nu}{\vartheta T_s} = \nu(1-\mu_\rho) - \mu_\rho \sum_{\varkappa=0}^{\nu=1} \frac{R_{\nu-\varkappa}}{R_1}.$$

Отсюда на основании уравнения 157 находят

$$\frac{t_\nu}{\vartheta T_s} = \nu(1-\mu_\rho) + \sum_{\varkappa=0}^{\nu=1}\left[\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-\varkappa-1} - 1 + \mu_\rho\right] = \sum_{\varkappa=0}^{\nu=1}\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-\varkappa-1},$$

а после суммирования геометрического ряда в конечном виде получают:

$$\frac{t_\nu}{T_s} = \vartheta \frac{1-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu}{1-\frac{\varepsilon}{\lambda}}. \qquad 193$$

Полученное уравнение служит для определения времени пуска в ход от начала включения реостата до того момента, когда сила тока на ν-й ступени достигает $\frac{I_2}{\lambda}$, т. е. до момента переключения на $\nu+1$-ю ступень. Для определения общей продолжительности пуска в ход двигателя следует в выражении 153 вместо ν подставить m, и тогда

$$\frac{t_m}{T_s} = \vartheta \frac{1-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m}{1-\frac{\varepsilon}{\lambda}},$$

так как на основании формулы 157 а

$$\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m = \frac{\frac{R_m}{R_1}\left(1-\frac{\varepsilon}{\lambda}\right) + (\varepsilon-1)}{\lambda-1}$$

то

$$\frac{t_m}{T_s} = \vartheta \frac{\lambda - \frac{R_m}{R_1}}{\lambda - 1}. \qquad 194$$

Вместо сопротивления цепи якоря R_m можно ввести величины: η_1, λ и j (см. уравнение 159); тогда уравнение 194 приобретает другой вид:

$$\frac{t_m}{T_s} = \vartheta \frac{\lambda}{\lambda - 1} [1 - j(1 - \eta_1)]. \qquad 194\text{a}$$

Пример. Для определения времени разбега двигателя необходимо знать скорость вращения его и маховой момент, или момент инерции вращающихся частей двигателя.

Для двигателя, пусковой реостат для которого рассчитывался ранее, даны:

скорость вращения $n = 1\,000$ *об/мин*,

маховой момент $GD^2 = 40$ $kg\,m^2$.

Отношение нагрузочного момента к максимальному пусковому определяется по формуле 183:

$$a = \frac{M}{D_2} = \frac{134}{200}\left[0{,}88 + (1 - 0{,}88)\frac{134}{200}\right] = 0{,}64.$$

Момент инерции вращающихся частей двигателя определяется из соотношения:

$$\Theta = m \cdot r^2 = \frac{GD^2}{4 \cdot 9{,}81} = \frac{40}{4 \cdot 9{,}81} = 1{,}02 \ kg\,m\,sec^2.$$

Кинетическая энергия вращающихся частей равняется:

$$A_s = \frac{\Theta \omega_s^2}{2} = \frac{1{,}02 \cdot (2\pi . 1000)^2 . 9{,}81}{2 \cdot 60^2 . 1\,000} = 54{,}8\,kJ,$$

и постоянная времени разбега двигателя определяется из формулы 186, т. е.:

$$T_s = \frac{2A_s}{P_a} = \frac{2 \cdot 54{,}8 \cdot 10^3}{220 \cdot 200} = 2{,}5 \ sec.$$

Подсчет постоянной ϑ (уравнение 189 а) дает:

$$u = \frac{0{,}88}{2} + \sqrt{\frac{0{,}88^2}{4} + 0{,}64(1 - 0{,}88)} = 0{,}96.$$

$$\vartheta = \frac{1}{2\cdot 0{,}96 - 0{,}88}\,\frac{1}{0{,}96^2}\left[\left(\frac{0{,}96}{0{,}96 - 0{,}88}\right)^2 \ln\frac{1 + 1{,}025\cdot 0{,}96 - 1{,}025\cdot 0{,}88}{1 + 0{,}96 - 0{,}88} + \right.$$

$$\left. + \ln\frac{1 - 0{,}96}{1 - 1{,}025\cdot 0{,}96}\right] - \frac{1{,}025 - 1}{0{,}96^2 - 0{,}88\cdot 0{,}96} = 1{,}38^\circ\ \text{C}.$$

И, наконец, по формуле 194 общее время разбега двигателя получается:

$$t_m = 2{,}5\cdot 1{,}38\cdot\frac{1{,}25 - \frac{0{,}164}{1{,}094}}{1{,}25 - 1} = 15{,}2\ sec.$$

§ 44. Нагревание сопротивлений. Предыдущие выводы показывают, что сопротивления отдельных ступеней пускового реостата имеют различные значения; кроме того и время, в течение которого каждая ступень реостата находится под током, неодинаково, поэтому и поглощаемая энергия в каждой ступени различна. Средняя мощность, поглощаемая сопротивлением ν-й ступени, может быть определена по формуле:

$$P_\nu = \frac{R_\nu - R_{\nu+1}}{t_\nu - t_{\nu-1}}\int_{t_{\nu-1}}^{t_\nu} I^2\,dt. \qquad 195$$

Это уравнение, на основании соотношений, выраженных уравнениям 182 а и 187 а, может быть представлено в виде:

$$P_\nu = \frac{R_\nu - R_{\nu+1}}{t_\nu - t_{\nu-1}}\,I_2^2 T_s\left(1 - \mu_\rho + \mu_\rho\frac{R_\nu}{R_1}\right)\text{K},$$

где

$$\text{K} = \int_{1/\varepsilon}^{1}\frac{\left(\frac{I}{I_2}\right)^2 d\,\frac{I}{I_2}}{\left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho)\frac{I}{I_2}\right]^2\left[\mu_\rho\frac{I}{I_2} + (1 - \mu_\rho)\left(\frac{I}{I_2}\right)^2 - \alpha\right]}. \qquad 196$$

Интегрирование последнего выражения для случая пуска в ход при постоянной нагрузке ($\alpha = Const$) дает следующий результат

$$\text{K} = \frac{1}{(1 - \mu_\rho)^2}\cdot\frac{1}{2u - \mu_\rho}\left[\left(\frac{u - \mu_\rho}{u}\right)^2 \ln\frac{1 - u}{1 - \varepsilon u} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{u}{u - \mu_\rho}\right)^2 \ln\frac{1 + \varepsilon u - \varepsilon\mu_\rho}{1 + u - \mu_\rho} - \frac{\mu_\rho^2(\varepsilon - 1)(2u - \mu_\rho)}{u^2 - u\mu_\rho}\right], \qquad 196\text{ a}$$

где u имеет то же значение, что и в формуле, определяющей постоянную ϑ (см. формулу 189 а).

Для частных случаев постоянная K приобретает следующее значение:

1) ненасыщенный сериесный двигатель:

$$\mu_\rho = 0; \quad \varepsilon = \lambda; \quad u = \sqrt{a}$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{a}}\left[\operatorname{Arc\,tg} h\lambda\sqrt{a} - \operatorname{Arc\,tg} h\sqrt{a}\right] = a\vartheta + \lambda - 1; \qquad 197$$

a) пуск в ход двигателя вхолостую:

$$a = 0$$

$$K = \lambda - 1; \qquad 197\,a$$

b) пуск в ход двигателя под полной нагрузкой:

$$a = \frac{1}{j^2\lambda^2}$$

$$K = j\cdot\lambda\left[\operatorname{Arc\,tg} h\frac{1}{j} - \operatorname{Arc\,tg} h\frac{1}{j\lambda}\right]. \qquad 197\,b$$

2) шунтовой двигатель:

$$\mu_\rho = 1; \quad \varepsilon = 1; \quad u = 1;$$

$$K = a^2 \ln\frac{1-a}{\frac{1}{\lambda}-a} + \frac{\lambda^2-1}{2\lambda^2} + a\frac{\lambda-1}{\lambda}; \qquad 198$$

a) пуск в ход двигателя вхолостую:

$$a = 0$$

$$K = \frac{\lambda^2-1}{2\lambda^2}; \qquad 198\,a$$

b) пуск в ход двигателя под полной нагрузкой:

$$a = \frac{1}{j\cdot\lambda}$$

$$K = \frac{1}{j^2\cdot\lambda^2}\ln\frac{j\lambda-1}{j-1} + \frac{\lambda-1}{2j\cdot\lambda^2}\left[2 - j\lambda + j\right]. \qquad 198\,b$$

В общем виде для идеально холостого хода ($a = 0$) постоянная K выражается так:

$$K_0 = \frac{\lambda-1}{2}\frac{\varepsilon}{\lambda}\left(1 + \frac{\varepsilon}{\lambda}\right). \qquad 199$$

Для практического пользования рекомендуется заранее вычислить значения постоянной K и построить семейство кривых, выражающих зависимость K от α.

Так как

$$R_\nu - R_{\nu+1} = r_\nu,$$

а

$$t_\nu - t_{\nu-1} = T_s\left[1 - \mu_\rho + \mu_\rho \frac{R_\nu}{R_1}\right]\vartheta$$

(см. уравнение 188), то выражение для средней мощности, поглощаемой в ν-й ступени (уравнение 195), легко может быть преобразовано и представлено в виде:

$$P_\nu = I_2^2 \cdot R_1 \cdot \frac{r_\nu}{R_1} \frac{K}{\vartheta}. \qquad 195\text{ a}$$

Последняя формула показывает, что при $I_2 = \text{Const}$ и $\lambda = \text{Const}$ средняя поглощаемая мощность каждой ступени не зависит от времени включения реостата; эта мощность ν-й ступени совершенно одинакова для всех моментов времени, когда подвижной контакт стоит на 1, 2, 3 ... $\nu - 2$, $\nu - 1$, или ν-й ступени; таким образом значение P_ν является одновременно значением средней поглощаемой мощности за весь период нахождения ν-й ступени под током, т. е. за промежуток времени t_ν.

За время включения ступени сила тока колеблется в пределах от I_2 до I_1, что должно вызывать колебание температуры тела сопротивления ступени. Однако продолжительность каждого колебания силы тока, по сравнению с постоянной времени нагрева сопротивления ступени обычно мала, вследствие чего колебание температуры от изменения силы пускового тока незначительно и практически при расчетах им можно пренебречь.

Пусковые реостаты подвергаются нагреванию только лишь во время процесса пуска в ход двигателей; как только процесс пуска окончен, все ступени сопротивлений реостата коротко замыкаются, и сопротивления реостата охлаждаются. Если пуск в ход двигателя производится не часто, то в большинстве случаев период покоя бывает вполне достаточным для того, чтобы все части реостата смогли полностью охладиться, т. е. принять температуру окружающей среды. В нормальных пусковых реостатах постоянная времени нагрева бывает значительно больше периода полного пуска, поэтому во время пуска в ход температура отдельных ступеней реостата не достигает практически постоянного значения; таким образом можно считать, что во время включения реостат подвергается кратковременной нагрузке.

Иногда двигатели приходится пускать довольно часто; в таких случаях пусковой реостат подвергается повторной кратковременной

нагрузке. Обычно подобные условия пуска в ход характеризуются так называемой частотой включения f_h, т. е. числом включений в час с равномерным чередованием этих включений в течение длительного промежутка времени.

Как для просто кратковременной нагрузки, так и повторно кратковременной, расчет реостата на нагревание сводится к расчету на нагревание при длительной нагрузке, причем расчетная продолжительная мощность определяется по действительной поглощаемой мощности и коэффициенту перегрузки. Таким образом расчетная длительная мощность ν-й ступени равняется:

$$P_\nu' = \frac{P_\nu}{p} = \frac{1}{p} I_2^2 \cdot R_1 \frac{K}{\vartheta} \frac{r_\nu}{R_1}, \qquad 200$$

где p — коэффициент перегрузки, вычисляемый в зависимости от вида нагрузки каждой ступени реостата по ранее приведенным формулам 38, 39, 40 и др. Значения расчетных мощностей определяются для каждой ступени и по ним уже рассчитываются потом элементы сопротивления реостата.

Расчет на нагревание сопротивлений реостата можно провести иначе, не по данным относительного сопротивления ступеней, а по кинетической энергии, развиваемой двигателем во время пуска в ход. На основании ранее выведенных соотношений получается:

$$I_2^2 \cdot R_1 = E_k \cdot I_2 = c \cdot I_2 \cdot \Phi_2 \cdot \omega_s = D_2 \cdot \omega_s = \frac{\Theta \omega_s^2}{T_s} = 2\,\frac{A_s}{T_s}$$

и из уравнения 157 следует, что

$$\frac{r_\nu}{R_1} = \frac{R_\nu - R_{\nu+1}}{R_1} = \frac{\left[(\lambda-1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu - \varepsilon + 1\right]}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} - \frac{\left[(\lambda-1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu+1} - \varepsilon + 1\right]}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} =$$

$$= (\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu,$$

поэтому

$$P_\nu' = \frac{P_\nu}{p_\nu} = \frac{1}{p_\nu} \cdot \frac{2A_s}{T_s} \frac{K}{\vartheta} (\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu. \qquad 200\text{ a}$$

Как было указано ранее (см. уравнение 38), коэффициент перегрузки для повторно-кратковременной нагрузки равен:

$$p = \frac{1 - e^{-\frac{t_a + t_b}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}} = \frac{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}},$$

обозначая посредством

$$\psi = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}},$$

имеют

$$p = \frac{1}{\psi\left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right)},$$

и тогда коэффициент перегрузки для ν-й ступени равен

$$p_\nu = \frac{1}{\psi\left(1 - e^{-\frac{t_\nu}{T}}\right)}.$$

Обычно период включения реостата мал по сравнению с постоянной времени нагрева реостата, поэтому можно принять, что

$$1 - e^{-\frac{t_\nu}{T}} \cong \frac{t_\nu}{T}.$$

Таким образом получается:

$$P_\nu' = \psi\left(1 - e^{-\frac{t_\nu}{T}}\right)\frac{2A_s}{T_s}\frac{K}{\vartheta}(\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu \cong \psi\frac{2A_s}{T_s}\frac{K}{\vartheta}(\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu \frac{t_\nu}{T}$$

или

$$P_\nu' = \psi\, 2\frac{A_s}{T_s}\frac{K}{\vartheta}(\lambda - 1)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu t_\nu.$$

Величина $P_\nu' \cdot T$ представляет собою теплоемкость ν-й ступени — Q_ν.

Если принять во внимание уравнение 193, то выражение для тепловой емкости ν-й ступени приобретает следующий вид:

$$Q_\nu = P_\nu' \cdot T = 2\psi A_s K \frac{\lambda - 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu\right]. \qquad 201$$

Для расчета реостата интересно знать не только теплоемкость одной ступени, а также и всех ступеней. Общая теплоемкость реостата представляет сумму теплоемкостей всех ступеней:

$$Q = 2\psi K A_s \frac{\lambda - 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}\sum_{\nu=1}^{m-1}\left[\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{2\nu}\right] =$$

$$= 2\psi K A_s \frac{\lambda - 1}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}\frac{\varepsilon}{\lambda}\frac{\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m\right]\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1}\right]}{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2}. \qquad 202$$

Последнее выражение можно упростить, если воспользоваться уравнениями 157, 159 и 199, и тогда получается:

$$Q = 2\phi K A_s \frac{\lambda - \frac{R_m}{R_1}}{\lambda - 1} \frac{1 - \frac{R_m}{R_1}}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}, \qquad 203\text{ a}$$

$$Q = \phi A_s \frac{K}{K_o} \frac{\varepsilon}{\lambda} \left(\lambda - \frac{R_m}{R_1}\right)\left(1 - \frac{R_m}{R_1}\right), \qquad 203\text{ b}$$

и

$$Q = \phi A_s \frac{K}{K_o} \varepsilon \left[1 - j(1 - \eta)\right]\left[1 - j\lambda(1 - \eta)\right]. \qquad 203\text{ c}$$

Для идеального случая, когда двигатель, не имеющий потерь, пускается в ход вхолостую, т. е. при

$$\alpha = 0;\ K = K_o:\ \eta = 1; R_m = 0 \text{ и } \phi = 1,$$

общая теплоемкость сопротивлений пускового реостата равняется:

$$Q_o = \varepsilon \cdot A_s.$$

Для шунтового двигателя $\varepsilon = 1$, и тогда теплоемкость пускового реостата получается равной кинетической энергии вращающихся масс двигателя.

Для окончательного расчета реостата, т. е. определения сечения и длины проволоки, необходимой для отдельных ступеней, нужно знать теплоемкость каждой ступени.

Пример. Для рассчитываемого реостата определяются значения K, ϕ и Q_1, Q_2 . . .

Применяя формулу 196 а находят

$$K = \frac{1}{(1 - 0{,}88)^2} \frac{1}{2 \cdot 0{,}96 - 0{,}88} \left[\left(\frac{0{,}96 - 0{,}88}{0{,}88}\right)^2 \ln \frac{1 - 0{,}96}{1 - 1{,}025 \cdot 0{,}96} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{0{,}96}{0{,}96 - 0{,}88}\right)^2 \ln \frac{1 + 1{,}025 \cdot 0{,}96 - 1{,}025 \cdot 0{,}88}{1 + 0{,}96 - 0{,}88} - \frac{0{,}88^2 (1{,}025 - 1)(2 \cdot 0{,}96 - 0{,}88}{0{,}96^2 - 0{,}96 \cdot 0{,}88}\right] =$$

$$= 0{,}97.$$

Если взять элементы сопротивлений в виде проволочных спиралей, то постоянную времени нагрева такого рода устройства сопротивлений можно взять

$$T = 5{,}0 \ min$$

Далее, в условиях пуска в ход была задана частота пуска $f_h = 4$, т. е. время от начала одного пуска до начала другого, следующего за ним, равно 15 мин.

На основании этого коэффициент ψ равен:

$$\psi = \frac{1}{1 - e^{-\frac{15}{5}}} = \frac{1}{1 - e^{-3}} = \frac{1}{0{,}952} = 1{,}05.$$

Теплоемкость первой ступени реостата выражается (см. ур. 201)

$$Q_1 = 2 \cdot 1{,}05 \cdot 54{,}8 \cdot 0{,}97 \frac{1{,}25 - 1}{1 - \frac{1{,}025}{1{,}25}} \left(\frac{1{,}025}{1{,}25}\right) \left[1 - \left(\frac{1{,}025}{1{,}25}\right)\right] = 22{,}8 \ k\,Joule.$$

Аналогично подсчитываются теплоемкости и для всех остальных ступеней реостата, и получают значения:

$$Q_2 = 33{,}6 \ k\,Joule$$
$$Q_3 = 38{,}4 \quad ,,$$
$$Q_4 = 38{,}4 \quad ,,$$
$$Q_5 = 36{,}2 \quad ,,$$
$$Q_6 = 32{,}8 \quad ,,$$
$$Q_7 = 29{,}0 \quad ,,$$

Из последнего ряда чисел видно, что теплоемкость достигает на 3-й и 4-й ступенях максимума, после чего опять спадает; это можно доказать и теоретически, если взять производную и найти максимум $Q_\nu = f(\nu)$ (ур. 201).

Действительно, выражение 201 можно представить в виде:

$$Q_\nu = C\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu\right],$$

где C — постоянная величина.

Если взять первую производную от последнего уравнения и приравнять к нулю, то по обозначении $\frac{\varepsilon}{\lambda}$ через a, получается:

$$a^\nu \ln a (1 - a^\nu) - a^\nu \ln a^\nu = 0$$

или

$$a^\nu = 1 - a^\nu$$

$$a^\nu = \frac{1}{2},$$

откуда ν, соответствующее максимуму теплоемкости, определяется как

$$\nu = \frac{\ln 0{,}5}{\ln a}.$$

Для данного случая, т. е. когда

$$\frac{\varepsilon}{\lambda} = \frac{1{,}025}{1{,}25} = 0{,}82,$$

$$\nu = \frac{\ln 0{,}5}{\ln 0{,}82} = 3{,}5,$$

т. е., что и имеет место в найденном ряде величин теплоемкости ступеней реостата, где максимум получился на 3-й и 4-й ступенях. Из уравнения 201 не трудно видеть, что ряд значений теплоемкостей отдельных ступеней реостата может получиться вообще и все время убывающим, начиная с первой ступени или все время возрастающим в зависимости от значения отношения $a = \frac{\varepsilon}{\lambda}$.

После того как известны теплоемкости отдельных ступеней реостата и их сопротивления, не представляет никаких затруднений определить необходимое количество материала сопротивления для каждой ступени, а следовательно и сечение и длину проволоки, если задаться допустимым значением повышения температуры и удельным сопротивлением материала.

В самом деле, так как теплоемкость можно выразить:

$$Q_\nu = \tau_m \cdot G_\nu \cdot q,$$

то вес материала можно определить как

$$G_\nu = \frac{Q_\nu}{\tau_m \cdot q}$$

и следовательно объем

$$V_\nu = \frac{G_\nu}{\gamma} = \frac{Q_\nu}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma}.$$

С другой стороны

$$r_\nu = \frac{\rho \cdot l_\nu}{s_\nu 10^4} = \frac{\rho \cdot l_\nu \cdot s_\nu}{10^4 s_\nu^2} = \frac{\rho \cdot V_\nu}{10^4 s_\nu^2},$$

где l_ν и s_ν выражены в *cm* и в *cm*^{2}.

Из последних двух соотношений следует:

$$s_\nu^2 = \frac{\rho \cdot Q_\nu}{\tau_m r_\nu q \gamma 10^4},$$

откуда

$$s_\nu = \sqrt{\frac{\rho \cdot Q_\nu}{\tau_m r_\nu q \gamma 10^4}}\ cm^2$$

$$l_\nu = \frac{V_\nu}{s_\nu}\ cm = \frac{Q_\nu}{\tau_m q \gamma s_\nu}\ cm.$$

Если взять материалом для изготовления сопротивлений никелин с следующими данными его:

$$\rho = 0{,}4\ \frac{\Omega\ mm^2}{m}$$

$$q = 0{,}40\ \frac{Joule}{g \cdot {}^\circ C}$$

$$\gamma = 8{,}98\ \frac{g}{cm^3},$$

то сечения проволоки для отдельных ступеней, при условии нагрева ее на 200° C, получаются равными:

$$s_1 = \sqrt{\frac{0{,}4 \cdot 22800 \cdot 10^{-4}}{200 \cdot 0{,}4 \cdot 8{,}98 \cdot 0{,}223}} = 0{,}0745\ cm^2 = 7{,}45\ mm^2,$$

аналогично

$$\begin{aligned}
s_2 &= 0{,}101\ cm^2 = 10{,}1\ mm^2 \\
s_3 &= 0{,}118\ \text{„} = 11{,}8\ \text{„} \\
s_4 &= 0{,}131\ \text{„} = 13{,}1\ \text{„} \\
s_5 &= 0{,}150\ \text{„} = 15{,}0\ \text{„} \\
s_6 &= 0{,}147\ \text{„} = 14{,}7\ \text{„} \\
s_7 &= 0{,}152\ \text{„} = 15{,}2\ \text{„}
\end{aligned}$$

Полученные сечения проволок необходимо заменить ближайшими стандартными и в соответствии с этим увеличить или уменьшить длину проволоки для того, чтобы сопротивления элементов получились равными расчетным.

После определения необходимых сечений имеется возможность подсчитать и необходимую длину проволоки для каждой ступени.

Длина проволоки первой ступени:

$$l_1 = \frac{22800}{200 \cdot 0{,}4 \cdot 8{,}98 \cdot 0{,}0745} = 425\ cm = 4{,}25\ m,$$

аналогично для остальных ступеней:

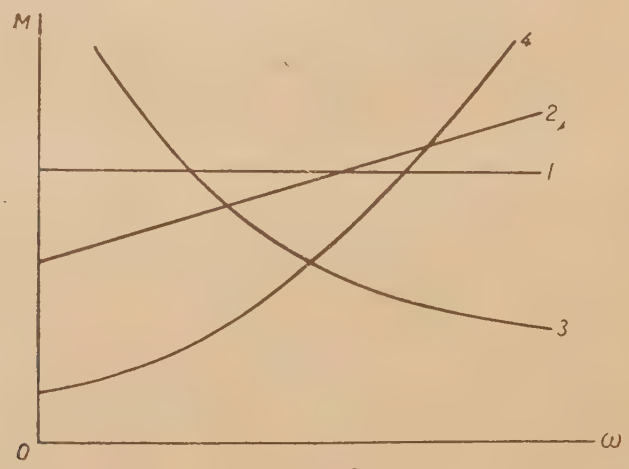
$$\begin{aligned}
l_2 &= 467\ cm = 4{,}67\ m \\
l_3 &= 443\ \text{„} = 4{,}43\ \text{„} \\
l_4 &= 413\ \text{„} = 4{,}13\ \text{„} \\
l_5 &= 364\ \text{„} = 3{,}64\ \text{„} \\
l_6 &= 313\ \text{„} = 3{,}13\ \text{„} \\
l_7 &= 269\ \text{„} = 2{,}69\ \text{„}
\end{aligned}$$

---

§ 45. Пуск в ход под переменной нагрузкой.— Выше был приведен аналитический расчет пускового реостата для случая пуска

двигателя при постоянной нагрузке. Если же во время пуска в ход нагрузочный момент изменяется, то аналитический способ решения задачи с целью определения всех необходимых данных для расчета реостата представляет большие затруднения. В этом случае более удобным является графический способ.

Обычно нагрузочный момент выражается в функции скорости вращения. На фиг. 148 изображены наиболее типичные кривые нагрузочных моментов электродвигателей. Кривая 1 относится к случаю постоянного момента; такие нагрузочные моменты могут создаваться, например, поршневыми насосами и т. д. Кривая 2 показывает изме-



Фиг. 148.

нение нагрузочного момента по закону прямой линии; подобным образом изменяются моменты в установках, где сопротивление возрастает почти прямо пропорционально скорости движения; например подъемные машины и пр. Кривая 3 показывает изменение моментов в том случае, когда мощность приводимого электродвигателем орудия, — например, токарные станки, — бывает постоянной, независимой от скорости вращения. Кривая 4 представляет квадратичное изменение моментов; приблизительно по такому закону изменяется момент, создаваемый вентилятором, центробежным насосом и т. д.

Ускоренное движение вращающихся масс можно выразить математически уравнением:

$$\theta \frac{d\omega}{dt} = D - M,$$

отсюда

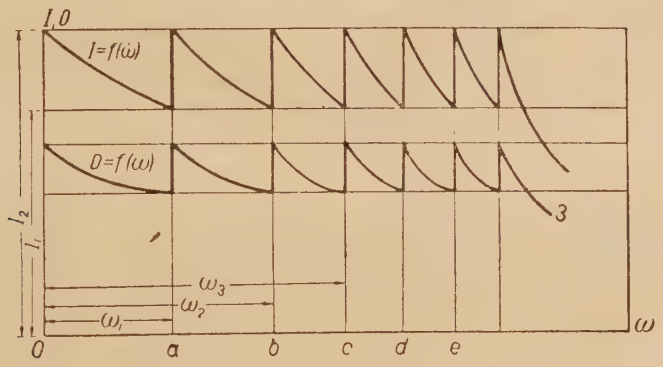
$$t = \theta \int \frac{d\omega}{D - M}.$$

Пусть $M = \alpha \cdot D_2$, где D_2 — момент, развиваемый двигателем при максимальном пусковом токе I_2; тогда

$$t = \theta \int \frac{d\omega}{D - \alpha D_2} = T_s \int \frac{d\,\frac{\omega}{\omega_s}}{\frac{D}{D_2} - \alpha}. \qquad 204$$

Здесь $T_s = \frac{\theta \omega_s}{D_2}$ — постоянная времени разбега.

Для определения общего времени разбега двигателя, а также промежутков времени разбега двигателя для различных положений подвижного контакта пускового реостата следует воспользоваться пусковой диаграммой Гёргеса (см. фиг. 149), с помощью которой строится другая, несколько видоизмененная, диаграмма, причем отличие ее от первой заключается в том, что она представляет графическое изобра-



Фиг. 149*а*.

жение изменений всех величин в функции угловой скорости ω, а не в зависимости от наводимого напряжения E.

Само перестроение диаграммы Гёргеса не представляет особых затруднений и выполняется следующим образом: строятся прямоугольные координаты; по оси абсцисс в произвольном масштабе откладываются значения угловой скорости от 0 до ω_s. На этой оси наносятся точки, соответствующие скоростям, при которых происходят переключения ступеней. Эти скорости на диаграмме Гёргеса определяются по тангенсам углов β, которые образуют с осью ординат лучи, проведенные через точки c_1, c_2,...c_ν. Легко понять, что на диаграмме Гёргеса (см. фиг. 149*а*) отрезки *oa*, *ob*, *oc* и т. д. представляют в некотором масштабе угловые скорости ω_1, ω_2...ω_ν, соответствующие моментам переключения ступеней 1, 2...ν; поэтому, если на вновь строящейся диаграмме масштаб абсцисс выбрать одинаковым с масштабом угловых скоростей, выражающихся отрезками *oa*, *ob*..

и т. д. на диаграмме Гёргеса, то нанесение точек на ось абсцисс диаграммы фиг. 149*a* может быть упрощено.

Отложив на новой диаграмме (см. фиг. 149*a*) ω_1, ω_2... ω_ν, проводят ординаты, на которых откладываются токи I_1 и I_2. Подобным образом производятся построения силы тока и для промежуточных значений ω. В результате графическое изображение функции $I = f(\omega)$ получается в виде ступенчатой кривой (см. фиг. 149*a*).

После построения кривой $I = f(\omega)$ приступают к нанесению заданной кривой нагрузочных моментов $M = \varphi(\omega)$ и построению кривой моментов, развиваемых двигателем во время пуска в ход при различных скоростях вращения.

Момент, развиваемый двигателем, равен (см. ур. 181)

$$D = c \cdot I \cdot \Phi_2 \left[\mu_\rho + (1 - \mu_\rho) \frac{I}{I_2} \right].$$

Так как

$$\frac{\mu_\rho}{1 - \mu_\rho} I_2 = J,$$

то

$$D = c \cdot I \cdot \Phi_2 M_\rho \left[1 + \frac{I}{J} \right] = Const\, I\,(I + J).$$

Последняя формула показывает, что для построения кривой $D = \varphi(\omega)$ можно воспользоваться кривой $I = f(\omega)$.

По ординате этой кривой для каждого значения ω можно легко вычислить произведение $I(J + I)$ и по полученным результатам построить кривую

$$D = Const\; I \cdot (J + I) = \varphi(\omega).$$

Эта кривая на диаграмме фиг. 149*a* обозначена цифрой 3. В большинстве случаев диаграмма пуска в ход строится так, что по осям координат откладываются относительные значения I, D, M и ω, т. е.

$$\frac{I}{I_2}, \frac{D}{D_2}, \frac{M}{D_2} \text{ и } \frac{\omega}{\omega_s}.$$

Поэтому для ординат всех величин может быть выбран один и тот же масштаб, что значительно упрощает как само построение диаграммы, так и пользование ею. На фиг. 149*b* представлена пусковая диаграмма, координаты которой выражают значения вышеуказанных относительных величин.

Имея в распоряжении такую диаграмму, можно теперь приступить и к определению времени включения каждой ступени.

Уравнение 204 показывает, что

$$t = T_s \int \frac{1}{\frac{D}{D_2} - \alpha} d\,\frac{\omega}{\omega_s} = T_s \int y \cdot d\,\frac{\omega}{\omega_s}$$

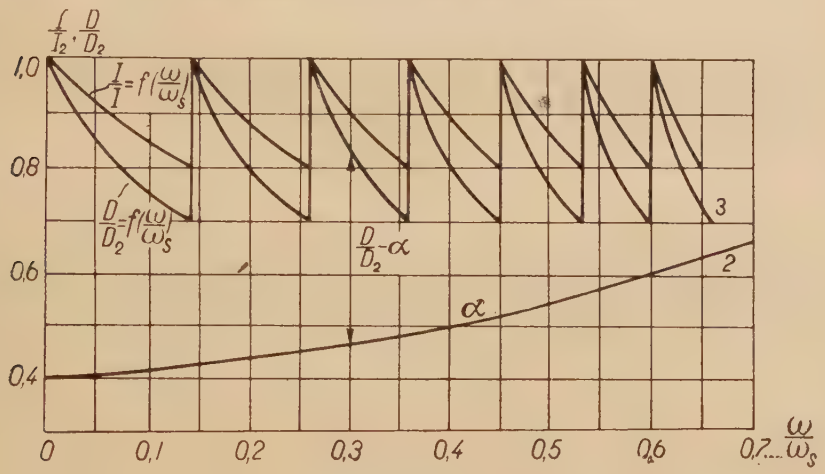
или

$$\frac{t}{T_s} = \int y \cdot d\,\frac{\omega}{\omega_s}, \qquad 205$$

где

$$y = \frac{1}{\frac{D}{D_2} - \alpha}. \qquad 206$$

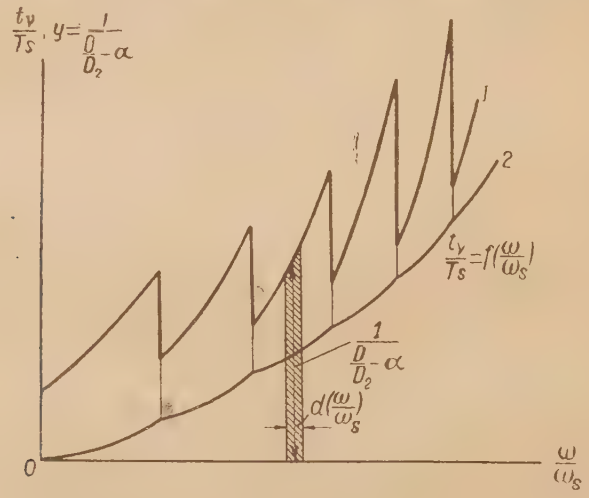
На диаграмме фиг. 149*b* величина $\frac{D}{D_2} - \alpha$ для различных α представляется отрезками, заключенными между кривыми 2 и 3. Пользуясь



Фиг. 149*b*.

этими кривыми. строят новую диаграмму, представляющую графическое изображение величины, обратной $\left(\frac{D}{D_2} - \alpha\right)$, в зависимости от $\frac{\omega}{\omega_s}$, т. е. кривую $y = \varphi\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)$ (см. фиг. 150), и легко понять, что площадь, ограниченная этой кривой, абсциссой $\frac{\omega_\nu}{\omega_s}$ и соответствующей ординатой $\left(\frac{1}{\frac{D}{D_2} - \alpha}\right)$, выражает так называемое относительное время разбега двигателя с момента начала пуска в ход до конца включения ν-й ступени, т. е. $\frac{t_\nu}{T_s}$. На фиг. 150 зависимость $\frac{t_\nu}{T_s}$ от $\frac{\omega}{\omega_s}$ представлена кривой — 2; пользуясь этой кривой, легко определить продолжительность включения каждой ступени.

Дальнейший ход расчета на нагревание реостата, предназначаемого для пуска в ход двигателя с переменным нагрузочным моментом, направляется к определению средней мощности, поглощаемой каждой ступенью реостата. Для более полного определения этой величины



Фиг. 150.

приходится прибегать к графическому методу, для чего, пользуясь кривыми $\frac{I}{I_2}=f\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)$, $\frac{t_v}{T}=\varphi\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)$ (фиг. 149*b*) и (фиг. 150), строят кривые $I=\varphi(t)$ и $I_2\cdot R_v=f(t)$ для каждой ступени. Приближенно же среднюю поглощаемую мощность каждой ступени можно вычислить по формуле:

$$P_v=I_1\cdot I_2\cdot r_v.$$

*

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

СТУПЕНЧАТЫЙ ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*

§ 46. Диаграмма токов и напряжений. — В основу расчета ступенчатых реостатов для пуска в ход асинхронных двигателей кладутся те же данные и условия, что и при расчете пусковых реостатов для двигателей постоянного тока. Но здесь, кроме того, необходимо иметь еще сведения о коэффициенте мощности ($\cos \varphi$), соотношении между напряжениями статора и ротора и др.

Фиг. 151.

Пусковые реостаты для асинхронных двигателей состоят из предварительных и пусковых сопротивлений, выключаемых в каждую цепь фазовой обмотки ротора. На фиг. 151 приведена осциллограмма, показывающая зависимость силы тока от времени при процессе пуска в ход.

При расчетах пусковых реостатов для асинхронных двигателей приходится прибегать к построению диаграммы Гейланда (Heyland), причем эта диаграмма для удобства пользования строится не для сил токов цепи статора, а для напряжений цепи ротора.

С целью упрощения всех выводов полагают, что двигатель обладает весьма малым омическим сопротивлением статорной обмотки ($R_s = 0$) и что потери холостого хода его почти равны нулю ($P_o = 0$). Такое положение вполне допустимо для расчета пусковых реостатов двигателей большой мощности, имеющих в действительности очень малое омическое сопротивление статорной обмотки и высокий коэффициент полезного действия (малые потери в железе и на трение).

Что касается расчета реостатов для двигателей малой мощности, то здесь особой точности не требуется, поэтому вышеупомянутое положение тоже может быть допущено.

Наиболее важными величинами, характеризующими электрические свойства ротора асинхронного двигателя, является его так называемое трансформаторное напряжение — E_{or} и идеальный ток короткого замыкания — I_{kr}. Напряжение E_{or} может быть непосредственно измерено на контактных кольцах при разомкнутой цепи неподвижного ротора; это напряжение, как известно, пропорционально угловой частоте тока статора ω, числу витков обмотки ротора и потоку, создаваемому намагничивающим током — I_{so}.

Идеальный ток короткого замыкания I_{kr} представляет собою тот ток, который имеет место в обмотке ротора при вращении последнего с бесконечно большой скоростью, или в том случае, когда ротор, не обладая никаким омическим сопротивлением своей обмотки, вращался с произвольной скоростью (за исключением синхронной).

Само видоизмененное построение диаграммы Гейланда для случая, когда $R_s = 0$ и $P_o = 0$, основано на следующих выводах.

Во время холостого хода, когда разомкнутый ротор находится в покое, в обмотке его наводится напряжение E_{or}, равное

$$E_{or} = c \cdot \Phi_o \cdot \omega_s, \qquad 207$$

где

Φ_o — магнитный поток вращающегося поля;

ω_s — угловая скорость вращения потока, зависящая от частоты трехфазного переменного тока f ($\omega_s = 2\pi \cdot f$).

При вращении ротора со скоростью ω относительная скорость вращения магнитного потока Φ_o равняется

$$\omega_r = \omega_s - \omega = \sigma \cdot \omega_s, \qquad 208$$

(здесь $\sigma = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$ — означает так называемое скольжение), и тогда в обмотке ротора наводится напряжение, равное:

$$E_r = c \cdot \Phi_r \cdot \omega_r = c \cdot \Phi_r \, \omega_s \cdot \sigma. \qquad 209$$

Обычно в асинхронных двигателях, питаемых от сети с постоянным напряжением, магнитный поток Φ_r очень мало изменяется с нагрузкой двигателя, поэтому можно сделать допущение, что Φ_r постоянно при всех скоростях вращения двигателя. Для случая, когда $\Phi_o = \Phi_r$, напряжение, наводимое в роторе — E_r, может быть выражено так:

$$E_r = c \cdot \Phi_r \cdot \omega_s \cdot \sigma = \sigma \cdot E_{or}. \qquad 210$$

Если цепь ротора замкнута, то наводимое в нем напряжение E_r уравновешивается, во-первых, омическим падением напряжения всей цепи $I_r \cdot R_r$ и реактивным падением напряжения $I_o \cdot X_r$, обусловленным потоками рассеяния ротора, причем здесь:

$$\dot{E}_r = \dot{I}_r \cdot \dot{R}_r + \dot{I}_r \cdot \dot{X}_r \qquad 211$$

и

$$E_r = I_r \cdot \sqrt{R_r^2 + X_r^2}. \qquad 211\text{ a}$$

Так как

$$E_r = \sigma \cdot E_{or}, \qquad 212$$

то

$$\sigma \dot{E}_{or} = \dot{I}_r \dot{R}_r + \dot{I}_r \cdot \dot{X}_r \qquad 213$$

и

$$\dot{E}_{or} = \dot{I}_r \cdot \frac{\dot{R}_2}{\sigma} + \dot{I}_r \frac{\dot{X}_r}{\sigma}. \qquad 214$$

Реактанц рассеяния ротора X_r, как известно, равен произведению из угловой скорости скольжения ω_r и коэффициента самоиндукции L_r; т. е.:

$$X_r = \omega_r \cdot L_r = \sigma \cdot \omega_s \cdot L_r. \qquad 215$$

Пусть $X_{or} = \omega_s \cdot L_r$ — реактанц рассеяния ротора для $\omega = 0\,(\omega_r = \omega_s)$, тогда

$$X_r = \sigma \cdot X_{or}. \qquad 216$$

На основании этого формула 214 принимает следующий вид:

$$\dot{E}_{or} = I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} + \dot{I}_r \cdot X_{or}. \qquad 217$$

Последнее выражение показывает, что для цепи вращающегося ротора, состоящей из омического сопротивления R_r и индуктивного X_r, электрический процесс можно заменить таковым же, но для неподвижного ротора, причем цепь ротора должна иметь постоянное индуктивное сопротивление, равное X_{or} и переменное омическое сопротивление

$$R_{or} = \frac{R_r}{\sigma}.$$

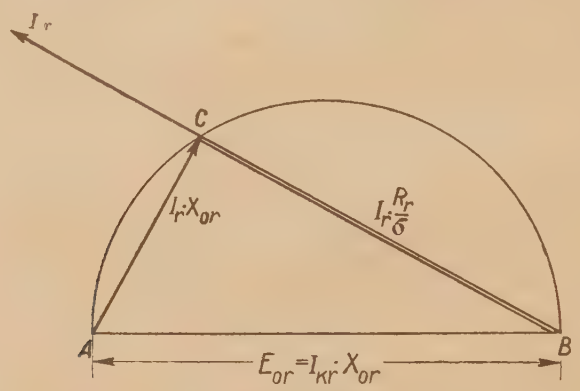
Графически этот процесс можно представить в виде векторной диаграммы напряжений, изображенной на фиг. 152.

На этой диаграмме по горизонтали отложен вектор напряжения $\dot{E}_{or}$, причем отрезок $AB = \dot{E}_{or}$; приняв точку B за начало, проводят луч под углом $\beta = \angle ABC$, значение тангенса которого равно $\frac{X_{or}\sigma}{R_r} = \frac{X_r}{R_r}$; этот луч должен служить направлением для вектора силы тока I_r.

Так как напряжение, компенсирующее омическое падение напряжения, т. е. $I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma}$, находится в фазе с силой тока I_r, то по направлению вектора $\dot{I}_r$ откладывается вектор $\dot{I}_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} = \overline{BC}$.

Соединив точку C с A, получают отрезок AC, который должен быть перпендикулярен к вектору I_r, и представляет собой, как легко понять, вектор индуктивного напряжения $\dot{I}_r X_{or}$.

Так как векторы $\dot{I}_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} = \overline{BC}$ и $\dot{I}_r \cdot X_{or} = \overline{AC}$ всегда взаимно перпендикулярны, то геометрическим местом вершин C, которые образуются катетами AC и BC прямоугольного треугольника ABC при



Фиг. 152.

различных силах тока I_r, является окружность, описанная на диаметре AB.

Омическое падение напряжения $I_r \frac{R_r}{\sigma}$ эквивалентной цепи ротора можно представить как бы состоящим из двух слагаемых:

1) омического падения напряжения, которое имеется в действительной цепи ротора, т. е. $I_r \cdot R_r$, и 2) напряжения, равного

$$E_r = \frac{I_r \cdot R_r}{\sigma} \cdot (1 - \sigma),$$

т. е.

$$I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} = I_r \cdot R_r + I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma}(1 - \sigma) = I_r \cdot R_r + E_r,$$

или

$$I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} = I_r \cdot R_r + I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} \cdot \frac{\omega}{\omega_s},$$

отсюда

$$E_r \cdot \frac{\omega_s}{\omega} = I_r \cdot R_r + E_r$$

Легко видеть, что последнее уравнение сходно с математическим выражением закона Ома для пусковой цепи двигателей постоянного тока (см. уравнение 145).

Действительно, если по аналогии с процессом пуска в ход двигателей постоянного тока обозначить посредством

$$E_{kr} = E_r \cdot \frac{\omega_s}{\omega} = I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma},$$

то получается, что,

$$E_r = \frac{\omega}{\omega_s} \cdot E_{kr},$$

и тогда уравнение 218 приобретает следующий вид:

$$E_{kr} = I_r \cdot R_r + E = I_r \cdot R_r + E_{kr} \cdot \frac{\omega}{\omega_s}. \qquad 219$$

Таким образом в основу расчета пускового реостата асинхронного двигателя может быть положен, как и при расчете реостатов для двигателя постоянного тока, закон Ома, выражающийся уравнением 218, причем здесь, в отличие от условий пуска в ход двигателей постоянного тока, E_{kr} имеет не постоянное, а переменное значение, меняющееся в зависимости от нагрузки.

С целью определения

$$E_{kr} = I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma}$$

и

$$E_r = \frac{\omega}{\omega_s} \cdot E_{kr} = I_r \cdot \frac{R_r}{\sigma} \cdot (1 - \sigma) = \frac{I_r \cdot R_r}{\sigma} - I_r \cdot R_r$$

и применяется видоизмененное построение диаграммы Гейланда.

Само построение диаграммы производится следующим образом:

По горизонтали откладывается отрезок $\overline{AB}$ (см. фиг. 153), представляющий вектор E_{or}.

Приняв середину этого отрезка, т. е. точку H за центр, описывают полуокружность. Как было уже ранее указано, эта полуокружность является геометрическим местом концов векторов напряжений для различных нагрузок двигателя.

Пусть точка C характеризует некоторое рабочее состояние двигателя. Соединив точку C с точками A и B, получают прямоугольный треугольник ABC. Тогда, для данной нагрузки, катет $\overline{AC}$ может служить вектором напряжения рассеяния цепи ротора $I_r \cdot X_r$, а катет $\overline{CB}$ вектором $\dot{E}_{kr}$, которое пропорционально потоку ротора и угловой скорости вращающегося магнитного поля, причем, как было показано выше,

$$E_{kr} = I_r \cdot R_r + E$$

и

$$E = \frac{\omega}{\omega_s} \cdot E_{kr}.$$

Величину E в соответствующем масштабе откладывают в виде отрезка от точки B по катету $\overline{BC}$, получая таким образом точку S. Тогда отрезок $\overline{SC}$ в выбранном масштабе дает омическое падение напряжения в цепи ротора $I_r \cdot R_r$, т. е.: $\overline{CS} = I_r \cdot R_r$.

Так как

$$\sigma = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s},$$

то, на основании вышенаписанных равенств, получается:

$$I_r \cdot R_r = \sigma \cdot E_{kr}. \qquad 220$$

Так как X_r при $\omega_s = Const$ имеет постоянное значение, то катет $\overline{AC}$, представляющий собой, по предыдущему, вектор реактивного падения напряжения в цепи ротора $I_r \cdot X_r$, может служить также вектором силы тока ротора * I_r, причем для нахождения масштаба вектора силы тока служат следующие соотношения:

$$\overline{AC}_{(mm)} \times a_{Volt/mm} = I_r \cdot \begin{matrix} E_{0r} \\ I_{kr} \end{matrix}$$

$$I_r = \frac{\overline{AC}_{(mm)} \times a_{Volt/mm}}{E_{0r}/I_{kr}} = \overline{AC}_{mm} \cdot b_{Amp/mm}.$$

Отсюда

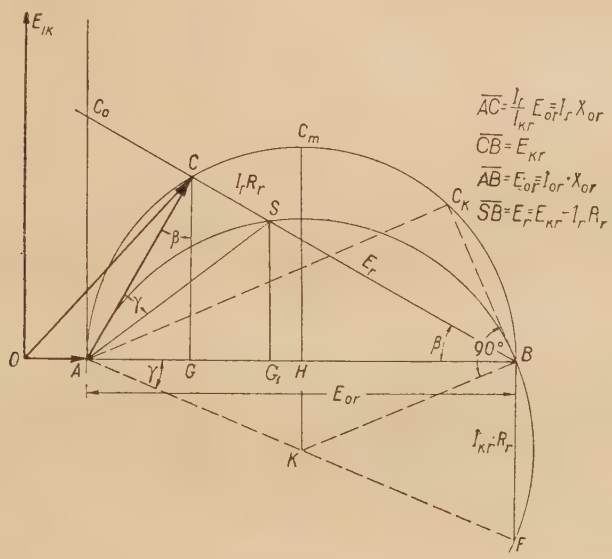
$$b_{Amp/mm} = \frac{a_{Volt/mm}}{E_{0r}/I_{kr}} = \frac{a_{Volt/mm}}{\overline{AB}_{mm} \cdot a_{Volt/mm}} \cdot I_{kr} = \frac{I_{kr}}{\overline{AB}_{mm}}.$$

Найдя масштаб для силы тока I_r, продолжают отрезок $\overline{AB}$ от начала A влево и на этом продолжении откладывают отрезок $\overline{OA}$, равный приведенному току холостого хода I'_{s0}; соединив же точку O с точкой C, получают отрезок OC, представляющий, как это легко понять, вектор приведенного тока статора I'_{s0}. Таким образом треугольник OCA служит диаграммой токов для двигателя.

Так как падение напряжения в статоре мало, то вектор первичного напряжения E_{1k} на этой диаграмме представлен направленным перпендикулярно к вектору $I'_{s0} = \overline{OA}$.

* Вектор силы тока $\dot{I}_r$ находится в квадратуре с вектором напряжения $\dot{I}_r \cdot \dot{X}_r$, но для удобства пользования диаграммой этот вектор совмещен с вектором $I_r X_r$.

Если из точки C опустить перпендикуляр на диаметр AB круга, то отрезок $\overline{CG}$, как известно, представляет собой в некотором масштабе крутящий момент, развиваемый двигателем.



Фиг. 153.

Из рассмотрения диаграммы фиг. 153 следует, что:

$$\overline{CG}=\overline{AC}\cdot\cos\beta=I_r\cdot\frac{E_{0r}}{I_{kr}}\cdot\cos\beta=I_r\cdot\frac{E_{0r}}{I_{kr}}\cdot\frac{\overline{CB}}{\overline{AB}}=$$

$$=I_r\cdot\frac{E_{0r}}{I_{kr}}\cdot\frac{E_{kr}}{E_{0r}}=I_r\cdot\frac{E_{kr}}{I_{kr}}. \qquad 221$$

С другой стороны электромагнитная мощность трехфазного двигателя равна:

$$D\cdot\omega_s=3\cdot E_{kr}\cdot I_r, \qquad 221a$$

где D — вращающий момент в *Joule*.

Из равенств 221 и 221a получается, что:

$$\overline{CG}=\frac{D\cdot\omega_s}{3\cdot I_{kr}}.$$

Далее, из диаграммы фиг. 153 видно, что отрезок SG_1, перпендикулярный к $\overline{AB}$, равен:

$$\overline{SG_1}=\overline{SB}\cdot\sin\beta=E_r\cdot\sin\beta=E_r\cdot\frac{\overline{CG}}{\overline{CB}}=$$

$$=E_r\cdot\frac{\overline{AC}}{\overline{AB}}=E_r\cdot\frac{I_r\cdot E_{0r}}{I_r\cdot E_{0r}}=E_r\cdot\frac{I_r}{I_r}=Const\ E_r\cdot I_r,$$

так как

$$\frac{CG}{CB} = \frac{AC}{AB}.$$

Последнее равенство показывает, что $\overline{SG}_1$ выражает в некотором масштабе механическую полезную мощность, развиваемую ротором двигателя, т. е. P_r.

Так как

$$P_r = 3 \cdot E_r \cdot I_r = (1 - \sigma) \cdot D \cdot \omega_s,$$

то

$$\overline{SG}_1 = \frac{P_r}{3 \cdot I_k} = P_r.$$

Диаграмма фиг. 153 показывает, что двигатель развивает наибольший крутящий момент тогда, когда его рабочий режим характеризуется точкой C_m, являющейся местом пересечения круга с перпендикуляром, восставленным из центра круга H к его диаметру $\overline{AB}$.

Для этой точки оба катета прямоугольного треугольника одинаковы между собой и соответственно равны:

$$I_{km} \cdot \frac{E_{or}}{I_{kr}} = E_{mr} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot E_{or}.$$

При этих обозначениях выражение для наибольшего крутящего момента, развиваемого двигателем, принимает вид:

$$D_m = 3 \cdot \frac{I_{kr} \cdot E_{0r}}{2 \cdot \omega_s}.$$

Скольжение, соответствующее этому моменту, на основании формулы 220 получается равным:

$$\sigma_m = \frac{I_{mr} \cdot R_r}{E_{mr}} = \frac{I_{kr} \cdot R_r}{E_{or}}. \qquad 222$$

Из формулы 220 легко также получить, что

$$\frac{I_r}{I_{kr}} = \frac{\sigma}{\sigma_m} \cdot \frac{E_{kr}}{E_{or}},$$

откуда

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = \frac{I_r}{I_{kr}} \cdot E_{or} : E_{kr} = \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}} = \operatorname{tg} \beta, \qquad 223$$

и так как

$$\sigma E_{kr} = I_r \cdot R_r = \overline{CS},$$

то

$$\sigma_m = \frac{\sigma \cdot E_{kr}}{\frac{I_r}{I_{kr}} \cdot E_{or}} = \frac{\overline{CS}}{\overline{AC}} = \operatorname{tg} \gamma;$$

последнее равенство показывает, что угол $\gamma = \angle CAS$ при всех нагрузках остается постоянным, так как σ_m зависит исключительно от E_{or}, I_{kr} и омического сопротивления цепи ротора R_r (см. равенство 222). Вследствие этого при всех перемещениях точки C по кругу все получающиеся прямоугольные треугольники CAS подобны между собой, т. е. стороны их $\overline{AS}$ и $\overline{CS}$ всегда изменяются пропорционально катету $\overline{AC}$. При этих условиях, если вершина C треугольника CAS движется по кругу, другая вершина его S должна также описывать окружность. Это вытекает из следующих геометрических соображений: угол ASB равен (см. фиг. 153) $\angle\gamma + \angle ACS = \angle(\gamma + 90°)$, а так как $\angle\gamma = Const$, то и угол ASB также не изменяется при перемещении точки C по кругу, т. е. точка S является вершиной постоянного угла, стягиваемого дугой некоторого круга.

Положение этого круга легко определяется следующим образом:

Если неизменный плоский угол γ со сторонами $\overline{AC}$ и $\overline{AS}$ вращать до совпадения стороны $\overline{AS}$ с осью абсцисс, т. е. до совпадения точки S с точкой B, то конец другой стороны его $\overline{AC}$, точка C, перемещаясь по кругу Гейланда, попадает в точку, обозначенную на чертеже 153 посредством C_k.

Для этого положения, как видно из чертежа, $E_r = 0$ и $E_{kr} = \dot{I}_r \cdot R_r$. Так как с другой стороны $I_r \cdot R_r = \sigma E_{kr}$, то следовательно, для этой точки $\sigma = 1$, т. е. мотор неподвижен, и точка C_k дает пусковые условия мотора.

Если вращая далее угол γ, привести в совпадение точки C и B, то точка S, перемещаясь по кругу скольжения, попадает в точку F.

Отрезок $\overline{FB}$ между кругами Гейланда и скольжения получается по предыдущему равным $I_r \cdot R_r$.

Из формулы 223 следует, что $\sigma = \sigma_m \cdot \operatorname{tg} \beta$. В данном случае $\angle\beta$, равный углу между осью абсцисс и направлением отрезка $I_r \cdot R_r$, составляет 90° (см. фиг. 153), откуда следует, что скольжение, соответствующее данной точке F, $\sigma_F = \infty$, и точка F соответствует условиям идеального короткого замыкания.

Так как $\angle ABF = 90°$, и точка A также принадлежит кругу скольжения, то отсюда следует, что диаметром искомого круга служит линия $\overline{AF}$, соединяющая точки A и F и составляющая с отрезком

$\overline{AB}$ угол γ. Центр этого круга получается, как это легко понять, в точке K пересечения продолжения перпендикуляра к прямой $\overline{AB}$, опущенного из точки C_m. Это ясно из того, что перпендикуляр $\overline{C_m H}$ пересекает прямую $\overline{AB}$, являющуюся хордой круга скольжения, в средней точке H.

Из рассмотрения фиг. 153 также следует, что линия $\overline{C_k B}$ является касательной к кругу скольжения.

Действительно:

$$\angle AC_kB = 90^\circ$$

$$\angle ABC_k = 90^\circ - \gamma$$

$$\angle KBA = \angle KAB = \gamma$$

$$\angle KBC_k = \angle KBA + \angle ABC_k = \gamma + (90^\circ - \gamma) = 90^\circ$$

т. е. прямая $\overline{C_k B}$, перпендикулярная к радиусу круга скольжения, касательна к нему в точке B.

На диаграмме фиг. 153 приведено построение искомой окружности, причем из построения следует также, что

$$\overline{BF} = \overline{AB} \cdot \operatorname{tg} \gamma = E_{or} \cdot \sigma_k = I_{kr} \cdot R_r.$$

Так как $I_{kr} = Const$, то отрезок $\overline{BF}$ является мерой для сопротивления цепи ротора.

Диаграмма фиг. 153 может быть использована также и для графического определения скольжения. С этой целью продолжают катет $\overline{BC}$ до пересечения с перпендикуляром, восстановленным из точки A к диаметру $\overline{AB}$. Полученная точка пересечения C_0 дает отрезок $\overline{AC_0}$, равный:

$$\overline{AC_0} = \overline{AB} \cdot \operatorname{tg} \cdot \beta.$$

Так как

$$\overline{AB} = E_0$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_k} = \operatorname{tg} \beta,$$

то

$$\overline{AC_0} = E_{or} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_k} = E_{or} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_k} \cdot \frac{E_{or}}{E_{or}} = \frac{\sigma \cdot E_{or}^2}{\sigma_k \cdot E_{or}} = \sigma \cdot \frac{E_{or}^2}{I_k \cdot R_r},$$

т. е. отрезок $\overline{AC_0}$ пропорционален скольжению σ и может таким образом служить для его определения. Сопротивление R_r, входящее во второй множитель, указывает, что масштаб для σ изменяется с изменением сопротивления цепи ротора, что необходимо иметь в виду при построении и пользовании указанной диаграммой.

§ 47. Расчет сопротивления ступеней. — Графический метод. Для определения числа ступеней реостата необходимо задаться значениями: наибольшего допустимого пускового тока в цепи ротора — I_{2r} и наименьшего — $I_{2r} \cdot \frac{1}{\lambda} = I_{1r}$.

Заданные значения наносятся на диаграмме Гейланда в масштабе напряжений в виде отрезков $\overline{AD} = I_{2r} \cdot \frac{E_{0r}}{I_{kr}}$ и $\overline{AC} = \frac{I_{2r}}{\lambda} \cdot \frac{E_{0r}}{I_{kr}}$, так что получаются две точки D и C, которые и соединяют с точкой B (фиг. 154).

Из предыдущего ясно, что прямая DB является геометрическим местом точек S (фиг. 154), определяющим сопротивление цепи ротора при неизменной силе тока ротора I_{2r}, в то время как прямая $\overline{CB}$ соответствуют сопротивлениям цепи ротора при постоянной силе тока $\frac{I_{2r}}{\lambda} = \dot{I}_{1r}$.

В момент пуска ротор двигателя неподвижен ($\sigma = 1$), сопротивление же ротора должно быть таково, чтобы ток ротора был равен заданной величине I_{2r}. При этом все напряжение ротора E_{2kr} идет на компенсацию только омического падения напряжения в цепи ротора.

Условие $\sigma = 1$, как было показано выше, геометрически выражается тем, что прямая, проведенная из точки круга напряжений Гейланда, соответствующей пуску, в данном случае D, в точку B, является касательной к кругу скольжения, соответствующего сопротивлению цепи ротора для первого положения подвижного контакта пускового реостата.

Этот круг скольжения, соответствующий наибольшему сопротивлению цепи ротора — R_{1r}, может быть построен следующим образом: к прямой $\overline{DB}$ в точке B восставляется перпендикуляр. Точка его пересечения K_1 с продолжением перпендикуляра, восставленного из центра круга Гейланда, и дает центр искомого круга. Если продолжить прямую AK до пересечения в точке F_1 с перпендикуляром, восставленным к прямой $\overline{AB}$ в точке B, то отрезок $\overline{BF_1}$ дает, как это было показано выше, в масштабе напряжений величину, пропорциональную сопротивлению цепи ротора, а именно:

$$\overline{BF_1} = I_{kr} \cdot R_1 *,$$

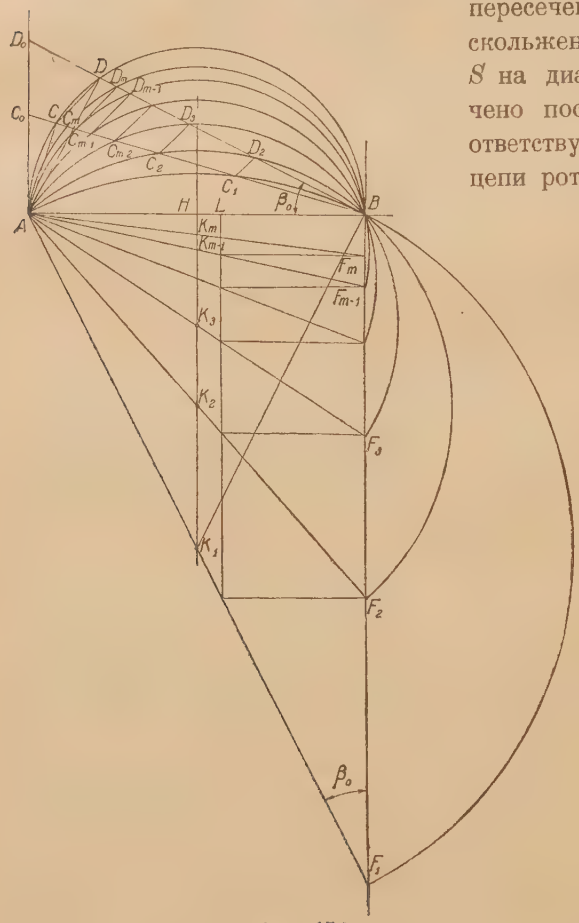
так как I_{kr} считается известным, то отсюда легко определяется R_1.

---

* В дальнейшем с целью упрощения надписания сопротивления цепи ротора обозначаются без индексов r.

При увеличении скорости вращения ротора, сила тока в роторе уменьшается, что на диаграмме фиг. 154 изображается перемещением точки S по наибольшему кругу скольжения K_1 от точки B по направлению к точке A, и легко понять, что положение точки S в месте пересечения прямой $\overline{BC}$ с кругом скольжения, — это положение точки S на диаграмме фиг. 154 обозначено посредством буквы C_1, — соответствует достижению силы тока цепи ротора величины:

$$I_{1r} = \frac{I_{2r}}{\lambda}.$$



Фиг. 154.

Как только в цепи ротора устанавливается сила тока:

$$I_{1r} = \frac{I_{2r}}{\lambda},$$

производят переключение на следующую ступень, причем в начальный момент включения новой ступени реостата в цепи ротора должна установиться попрежнему сила тока I_{2r}. Для этого необходимо, чтобы при новом положении пусковой рукоятки цепь ротора обладала определенным сопротивлением R_r.

Так как при переключениях ступеней реостата скорость вращения не успевает изменяться, то

$$I_{1r} \cdot R_1 = \sigma \cdot E_{1kr} = \sigma \cdot \overline{CB}$$

и

$$I_{2r} \cdot R_2 = \sigma \cdot E_{2kr} = \sigma \cdot \overline{DB}$$

отсюда следует, что

$$\frac{I_{1r} \cdot R_1}{I_{2r} \cdot R_2} = \frac{E_{1kr}}{E_{2kr}} = \frac{\overline{CB}}{\overline{DB}},$$

с другой стороны — точка S, характеризующая падение напряжения $I_{2r}R_{2r}$, должна лежать на прямой $\overline{DB}$. Пусть в этом случае $I_{2r}\cdot R_2$ представляется отрезком $\overline{DD_2}$; тогда

$$\frac{I_{1r}\cdot R_1}{I_2\cdot R_2}=\frac{\overline{CC_1}}{\overline{DD_2}}=\frac{\overline{CB}}{\overline{DB}}.$$

Последнее соотношение дает указание относительно простого способа определения отрезка $\overline{DD_2}$: из точки C_1 проводят прямую, параллельную отрезку $\overline{CD}$, до пересечения с прямой DB, и тогда полученная точка D_2 является местом положения точки S для начального момента включения второй ступени реостата.

По найденной точке D_2 определяется круг скольжения для сопротивления R_2, так как этот круг должен проходить через эту точку D_2 и точки A и B.

На построенном по точкам A, D_2 и B кругу скольжения с центром K_2 должна в дальнейшем перемещаться точка S при новом сопротивлении в цепи ротора от точки B к точке A. При достижении этой точкой положения, определяемого по предыдущему точкой C_2, выключается еще некоторая часть сопротивления цепи ротора и, исходя из условий $\sigma=Const$ и $I_{2r}=Const$, для этого нового положения находят точку D_3, для чего проводят прямую $\overline{C_2D_3}$, параллельную отрезку $\overline{CD}$.

Таким образом построения продолжаются, пока все внешнее сопротивление цепи ротора не окажется выключенным, чему соответствует точка D_m. Теперь в цепи ротора остается только одно внутреннее сопротивление обмотки ротора.

Точка S перемещается по m-му кругу скольжения до точки C_m и далее до точки, соответствующей току нормальной нагрузки.

Для каждого круга скольжения соответствующая точка F дает отрезок $\overline{BF}$, который, как было указано ранее, представляет значение сопротивления цепи ротора.

Аналитический расчет ступеней реостата. Расчет ступеней пускового сопротивления можно произвести также и аналитически.

Пусть трансформаторное напряжение, соответствующее максимальному пусковому току I_{2r}, равно $\overline{DB}=E_{2kr}$ и тоже напряжение тока переключения $I_{1r}=\frac{I_{2r}}{\lambda}$ равно $\overline{CB}=E_{1kr}=\frac{E_{2kr}}{\varepsilon}$, где $\varepsilon=\frac{E_{2kr}}{E_{1kr}}$.

Как только подвижной контакт установлен в ν-е положение, в цепи ротора действует сила тока I_{2r}, и для этого момента справедливо выведенное ранее соотношение:

$$I_{2r}\cdot R_\nu=\sigma_{\nu-1}\cdot E_{2kr}.$$

Перед началом же перехода контакта в ν-е положение, т. е. когда сила тока при $\nu-1$-м положении контакта достигает значения I_{1r}, имеет место равенство:

$$I_{1r} \cdot R_{\nu-1} = \frac{I_{2r}}{\lambda} \cdot R_{\nu-1} = \sigma_{\nu-1} \cdot \frac{E_{2kr}}{\varepsilon};$$

отсюда следует:

$$\frac{R_{\nu-1}}{R_{\nu}} = \frac{\lambda}{\varepsilon},$$

т. е. отношение сопротивления пусковых цепей для двух соседних положений подвижного контакта есть величина постоянная и сопротивления пускового реостата при вышепоставленных условиях изменяются, следовательно, по закону геометрической прогрессии.

В этом смысле асинхронный двигатель подобен шунтовому двигателю постоянного тока, с той лишь разницей, что ступени его сопротивления зависят не только от пределов колебания тока, но также от изменения напряжения.

На фиг. 154 видно, что $\overline{CB} > \overline{DB}$ или $\frac{E_{2kr}}{\varepsilon} > E_{2kr}$; откуда $\varepsilon < 1$ и очевидно, что при одинаковых пределах изменения силы тока реостата у асинхронного двигателя ступени реостата получаются более грубыми, нежели у шунтового двигателя постоянного тока.

Так как для любого положения подвижного контакта реостата можно написать

$$R_{\nu} = \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot R_{\nu-1},$$

то очевидно

$$R_{\nu-1} = \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot R_{\nu-2}$$

$$R_{\nu-2} = \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot R_{\nu-3}$$

и т. д.,

так что

$$R_{\nu} = \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot R_{\nu-1} = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2 \cdot R_{\nu-2} = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^3 \cdot R_{\nu-3} = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} \cdot R_1,$$

где R_1 — сопротивление, соответствующее отрезку $\overline{BF_1}$ (см фиг. 154), т. е. максимальное общее сопротивление цепи ротора.

Положив $\nu = m$, можно получить выражение для внутреннего сопротивления ротора в виде:

$$R_m = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1} \cdot R_1.$$

При помощи этого равенства легко определяется число ступеней реостата:

$$m - 1 = \frac{\ln R_m - \ln R_1}{\ln \varepsilon - \ln \lambda}.$$

По аналогии с расчетом реостатов для двигателей постоянного тока определение числа ступеней и сопротивлений для каждого положения подвижного контакта можно произвести также и по данным относительно коэффициента полезного действия двигателя и соотношения тока переключения к его номинальному току. Для асинхронных двигателей, в которых, как потери холостого хода, джоулевы потери в статоре принимаются равными нулю, коэффициент полезного действия равен:

$$\eta = \frac{E_{rn}}{E_{rn} + I_{nr} \cdot R_m} = 1 - \frac{I_{nr} R_m}{E_{rn}} = 1 - \sigma_n.$$

Для неподвижного состояния двигателя, когда цепь его ротора имеет сопротивление R_1, можно написать:

$$I_{2r} \cdot R_1 = E_{2kr};$$

приняв далее

$$E_{rn} = \frac{E_{2kr}}{\varepsilon_n},$$

получают выражение для η в следующем виде

$$\eta = 1 - \frac{I_{nr} \cdot R_m}{E_n} = 1 - \frac{I_{nr} \cdot R_m \cdot \varepsilon_n}{E_{2kr}} = 1 - \frac{I_{nr} \cdot \varepsilon_n}{I_{2r}} \cdot \frac{R_m}{R_1} = 1 - \frac{\varepsilon}{\lambda \cdot j} \cdot \frac{R_m}{R_1},$$

где

$$j = \frac{I_{1r}}{I_{nr}} = \frac{I_{2r}}{I_{nr}},$$

откуда

$$\frac{R_m}{R_1} = \frac{j \cdot \lambda}{\varepsilon_n}(1 - \eta).$$

Так как

$$R_m = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1} \cdot R_1,$$

то

$$\frac{\lambda \cdot j}{\varepsilon_n} = \left(1 - \eta\right) = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1}$$

На основании последней формулы можно также определить число ступеней реостата $m - 1$ для каждой фазовой цепи ротора.

§ 48. Определение продолжительности времени пуска в ход двигателя. — Если обозначить, как и раньше при изложении расчета пусковых реостатов для двигателей постоянного тока:

Θ — момент инерции ротора и всех маховых масс, с ним связанных,

ω — его угловую скорость,

D — момент, создаваемый вращающимся полем статора и M — момент нагрузки вместе с моментами, создаваемыми действием всех сил сопротивления, то дифференциальное уравнение, выражающее вращение двигателя во время его пуска в ход, имеет вид:

$$\Theta \cdot \frac{d\omega}{dt} = D - M.$$

Из этого уравнения определяется время пуска в ход:

$$t = \Theta \cdot \int \frac{d\omega}{D - M}.$$

Для решения этого интеграла, в нем необходимо сделать ряд преобразований, для чего пользуются диаграммой Гейланда.

Из рассмотрения диаграммы, изображенной на фиг. 153, легко установить, что

$$\frac{\overline{CB}}{\overline{AB}} = \frac{E_{kr}}{E_{or}} = \cos\beta,$$

или

$$\frac{E_{kr}}{E_{or}} = \cos\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_k}\right)^2}}. \qquad 224$$

Кроме того

$$\frac{I_r}{I_{kr}} = \frac{\sigma}{\sigma_m} \cdot \frac{E_{kr}}{E_{or}} = \operatorname{tg}\beta \cdot \cos\beta = \sin\beta$$

и

$$\frac{I_r}{I_{kr}} = \sin\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2\beta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma}\right)^2}}.$$

Так как

$$D = \frac{3 \cdot E_{kr} I_r}{\omega_s}$$

и

$$D_m = \frac{3 \cdot E_{or} \cdot I_{kr}}{2\omega_s},$$

го

$$\frac{D}{D_m} = 2 \cdot \frac{I_r}{I_{kr}} \cdot \frac{E_{kr}}{E_{or}} = 2 \sin\beta \cdot \cos\beta = 2 \sin\beta.$$

После подстановки значений $\sin \beta$ и $\cos \beta$ получается окончательно

$$D = \frac{2}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma}\right)^2}} \cdot D_m = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \sigma_m}{\sigma_m^2 + \sigma^2} \cdot D_m = \frac{2 \cdot \frac{\sigma}{\sigma_m}}{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^2} \cdot D_m. \quad 225$$

Полученное выражение для D и подставляется под знак интеграла.

Также целесообразно, как это принято вообще для асинхронных двигателей, представить нагрузочный момент M, как некоторую долю опрокидывающего момента двигателя, т. е.

$$\alpha = \frac{M}{D_m}.$$

Заменяя кроме того ω равной ей величиной $\omega_s(1 - \sigma)$, можно получить вышенаписанный неопределенный интеграл в виде:

$$t = T_k \cdot \int \frac{d(1 - \sigma)}{\frac{2 \frac{\sigma}{\sigma_m}}{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^2} - \alpha},$$

где

$$T_k = \frac{\Theta \cdot \omega_s}{D_m}$$

постоянная времени разбега при условии, что двигатель пускается вхолостую и развивает максимальный крутящий момент.

Решение интеграла приводит в результате к следующему выражению для продолжительности времени пуска в ход до момента перехода подвижного контакта из ν в $\nu + 1$ положение:

$$t_\nu = t_{\nu-1} + T_k \cdot \vartheta\, \sigma_{m\nu}, \quad 226$$

где

$$\sigma_{m\nu} = \frac{I_{kr} \cdot R_\lambda}{E_{or}}, \quad 227$$

скольжение, которое имеет ротор, развивая опрокидывающий момент при включении реостата в ν-м положении подвижного контакта, а

$$\vartheta = \int_{x_\nu}^{x_{\nu-1}} \frac{(1 + x^2)\, dx}{2x - \alpha(1 + x^2)} \quad 228$$

и

$$x = \frac{\sigma}{\sigma_{m\nu}}; \quad x_{\nu-1} = \frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}}; \quad x_{\nu} = \frac{\sigma_{\nu}}{\sigma_{m\nu}}.$$

Введя угол β в выражение для ϑ, его можно получить в более удобном для исследования виде, а именно:

$$\vartheta = \int_{\beta_1}^{\beta_0} \frac{d(2\beta)}{(1+\cos 2\beta)(\sin 2\beta - \sin 2\beta_n)}, \qquad 229$$

где β_1 и β_0 — углы на диаграмме фиг. 154, соответствующие токам $\frac{I_{2r}}{j}$ и I_{2r}, а угол β_n получается из значения для α:

$$\alpha = \frac{M}{D_m} = 3 \cdot \frac{E_{krn} \cdot I_{rn}}{\omega_s} : 3 \cdot \frac{I_{kr} \cdot E_{or}}{2 \cdot \omega_s} = 2 \cdot \frac{I_{rn}}{I_{kr}} \cdot \frac{E_{krn}}{E_{or}} = 2 \sin \beta_n \cdot \cos \beta_n = \sin 2\beta_n.$$

(Если M не равен номинальному крутящему моменту двигателя, то величины, отмеченные индексами n, относятся к установившемуся режиму двигателя при нагрузочном моменте M).

Легко заметить, что интеграл, обозначенный ϑ, есть величина, не зависящая от числа ступеней. Так как точки предельных значений величин для всех ступеней на диаграмме фиг. 154 лежат на прямых, соответствующих токам I_{2r} и $\frac{I_{2r}}{j}$, то значения $\frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}}$ определяются в начале каждой ступени током I_{2r}, а значения $\frac{\sigma}{\sigma_{m\nu}}$ в конце каждой ступени током $\frac{I_{2r}}{j}$ и вычисляются по формуле

$$\frac{I_{2r}}{I_{kr}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma}\right)^2}}. \qquad 230$$

Это также ясно видно из выражения для ϑ, так как в заданных границах коэффициент ϑ зависит только от β_n или, что то же, от α.

Если поэтому нанести значения ϑ, как неопределенного интеграла, для заданной нагрузки α в функции $\frac{\sigma}{\sigma_m}$, то легко можно для любых числовых значений $\frac{\sigma}{\sigma_m}$ найти соответствующие ординаты, разность которых дает значение ϑ.

Если, как это было сделано выше, отношение $\frac{\sigma}{\sigma_m}$ обозначить посредством x, то неопределенный интеграл, обозначенный через y, может быть представлен в следующем виде:

$$y = \frac{x}{\alpha} - \frac{2}{\alpha^2\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \ln \frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{1-\alpha^2} - \alpha x\right) -$$

$$- \frac{1}{\alpha^2}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} - 1\right) \ln\left(2x - \alpha - \alpha x^2\right). \qquad 231$$

Для $\alpha = 0$ это выражение имеет неопределенный вид. Этот случай соответствует пуску мотора вхолостую, и поэтому весьма важно иметь для него решение.

Считая α бесконечно малой величиной, можно выражение для y разложить в ряд по возрастающим степеням α:

$$y = \frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} \cdot \left[\frac{1 + \alpha x + \ln\left(2x - \alpha - \alpha x^2\right)}{1 + \sqrt{1-\alpha^2}} + \right.$$

$$\left. + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{(n+2)\cdot 2^{n+1}} \cdot \left(\frac{2x + \alpha + \alpha x^2}{1 + \sqrt{1-\alpha^2} + \alpha x}\right)^{n+2}\right]. \qquad 232$$

Если теперь положить $\alpha = 0$, то в результате всех преобразований получается:

$$y = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\ln 2x - \frac{x^2}{4}. \qquad 233$$

Общее же выражение для ϑ можно написать в следующем виде:

$$\vartheta = y(x_\nu) - y(x_{\nu-1}). \qquad 234$$

На основании этих выводов можно решить задачу о времени пуска и для многоступенчатого включения.

Для какой-либо ν-й ступени, как указано выше,

$$t_\nu = t_{\nu-1} + T_k \cdot \sigma_\nu \cdot \vartheta.$$

Во втором члене правой части этого равенства единственной величиной, зависящей от положения контакта, является величина $\sigma_{m\nu}$, которая, как известно, равна:

$$\sigma_{m\nu} = \frac{I_{kr} \cdot R_\nu}{E_{or}}.$$

Так как кроме того

$$R_\nu = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} \cdot R_1,$$

то выражение для t_ν принимает следующий вид

$$t_\nu = t_{\nu-1} + T_k \cdot \vartheta \cdot \frac{I_{kr} \cdot R_1}{E_{or}} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1}$$

или

$$t_\nu = t_{\nu-1} + T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1}.$$

В этом выражении, как видно из диаграммы фиг. 154,

$$\operatorname{ctg} \beta_o = \frac{I_{kr} \cdot R_1}{E_{or}} = \frac{\overline{BF_1}}{\overline{AB}}$$

Если начало отсчета времени пуска в ход производить с момента включения первого контакта пускового реостата ($t_o = 0$), то продолжительности времени включения реостата для различных положений подвижного контакта могут быть выражены математически следующим рядом

$$t_\nu = t_{\nu-1} + T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} = t_{\nu-2} + T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-2} +$$

$$+ T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} = t_{\nu-3} + T_k \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \left[\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-3} + \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-2} +\right.$$

$$\left. + \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1}\right] = T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \sum_{k=1}^{k=\nu} \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-k}. \qquad 235$$

После суммирования выражения под знаком Σ окончательно получается:

$$t_\nu = T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \cdot \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}}. \qquad 236$$

Для $\nu = m$, последняя формула дает выражение для общего времени пуска:

$$t_m = T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{ctg} \beta_o \cdot \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m}{1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}} \qquad 237$$

или, если принять во внимание, что

$$R_m = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1} \cdot R_1$$

и

$$\frac{1-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m}{1-\frac{\varepsilon}{\lambda}}=\frac{\lambda-\frac{\varepsilon^m}{\lambda^{m-1}}}{\lambda-\varepsilon}=\frac{\lambda-\varepsilon\cdot\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1}}{\lambda-\varepsilon},$$

то

$$t_\nu=T_k\cdot\vartheta\cdot\operatorname{ctg}\beta_o\cdot\frac{\lambda-\varepsilon\cdot\frac{R_m}{R_1}}{\lambda-\varepsilon}. \qquad 238$$

Полученное равенство можно также еще видоизменить, имея в виду, что:

$$\frac{R_m}{R_1}=\frac{\lambda\cdot j}{\varepsilon_n}\cdot(1-\eta),$$

тогда

$$t_m=T_k\cdot\vartheta\cdot\operatorname{ctg}\beta_o\frac{\lambda-\varepsilon\cdot\frac{\lambda\cdot j}{\varepsilon_n}\cdot(1-\eta)}{\lambda-\varepsilon}=$$

$$=T_k\cdot\vartheta\cdot\operatorname{ctg}\beta_o\cdot\frac{\lambda}{\lambda-\varepsilon}\cdot\left[1-j\cdot\frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}(1-\eta)\right]. \qquad 239$$

Полученное равенство для t_ν имеет выражение аналогичное с таковыми же для двигателей постоянного тока.

Основное же их различие заключается лишь в том, что величина E_{kr} для асинхронных двигателей, соответствующая напряжению на зажимах двигателя постоянного тока, не является, как уже было выше указано, величиной постоянной.

§ 49. Нагревание сопротивлений ступеней реостата. — Исходным пунктом для расчета реостатов на нагревание служит уравнение для средней поглощаемой мощности ν-й ступени:

$$P_\nu=\frac{R_\nu-R_{\nu+1}}{t_\nu-t_{\nu-1}}\cdot\int_{t_{\nu-1}}^{t_\nu}I_r^2\cdot dt, \qquad 240$$

подставив сюда:

$$dt=\frac{D-M}{\Theta}\cdot d\omega$$

и

$$I_r=I_{kr}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^2}}$$

и произведя преобразования, подобные произведенным при расчете времени пуска, можно получить для средней мощности, поглощаемой одной ступенью, следующее выражение:

$$P_\nu=I_{kr}^2\cdot R_1\frac{K}{\vartheta}\cdot\frac{R_\nu-R_{\nu-1}}{R_1}, \qquad 241$$

где

$$K = \int_{x_\nu}^{x_{\nu-1}} \frac{x^2 \cdot dx}{2x - \sigma - \alpha x^2}, \qquad 242$$

а

$$x = \frac{\sigma}{\sigma_{m\nu}},$$

ϑ имеет то же значение, что и в выражении для t_ν (см. формулу 234).

Решение этого неопределенного интеграла дает:

$$z = \frac{x}{\alpha} + \frac{2 - \alpha^2}{\alpha^2 \sqrt{1 - \alpha^2}} \cdot \ln \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \alpha^2} - \alpha x\right) -$$

$$- \frac{(1 - \sqrt{1 - \alpha^2})^2}{2\alpha^2 \cdot \sqrt{1 - \alpha^2}} \cdot \ln (2x - \alpha - \alpha x^2). \qquad 242a$$

Для случая пуска вхолостую ($\alpha = 0$) полученное выражение для z приобретает следующее значение:

$$z = -\frac{1}{2} - \frac{1}{4} x^2. \qquad 242b$$

С целью определения значения K удобно, как это было указано при расчете времени пуска, для различных α нанести z, как функцию x, и значение интеграла K для заданных границ x определять, как разность соответствующих ординат.

В рассматриваемом случае заданные границы определяется, как:

$$x_{\nu-1} = \frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}} = \frac{I_{2r}}{\sqrt{I_{kr}^2 - I_{2r}^2}}$$

и

$$x_\nu = \frac{\sigma_\nu}{\sigma_{m\nu}} = \frac{\frac{I_2}{j}}{\sqrt{I_{kr}^2 - \left(\frac{I_{2r}}{\lambda}\right)^2}},$$

так что:

$$= z \cdot (x_\nu) - z\,(x_{\nu-1}). \qquad 243$$

Можно поставленную задачу разрешить несколько иначе.

Для начала и конца включения ν-й ступени действительны соотношения:

$$I_{2r} \cdot R_\nu = \sigma_{\nu-1} \cdot E_{2kr}$$

и

$$\frac{I_{2r}}{j} R_\nu = \sigma_\nu \cdot \frac{E_{2kr}}{\varepsilon},$$

отсюда

$$\frac{\sigma_\nu}{\sigma_{\nu-1}} = \frac{\varepsilon}{\lambda}.$$

Так как

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = \operatorname{tg}\beta,$$

то

$$x_{\nu-1} = \frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}} = \operatorname{tg}\beta_o,$$

и

$$x_\nu = \frac{\sigma_\nu}{\sigma_{m\nu}} = \frac{\varepsilon}{\lambda}\cdot\operatorname{tg}\beta_o,$$

и тогда для пуска в ход двигателя без нагрузки получается весьма простое выражение:

$$K_o = \frac{1}{4}\operatorname{tg}^2\beta_o\left[1-\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right]. \qquad 244$$

Так как интеграл K есть функция только x_ν и $x_{\nu-1}$, значения которых от номера ступени не зависят, то следовательно и значение K от ступеней не зависит.

Ранее подобное положение было установлено для величины ϑ. Исходя из этого положения, можно, как и для случая пуска в ход двигателя постоянного тока, считать, что средняя мощность, потребляемая каждой ступенью за все время включения этой ступени t_ν,— есть величина постоянная.

Расчетная же мощность или мощность, соответствующая тому же нагреву при продолжительной нагрузке для ν-й ступени, равняется:

$$P_\nu = \frac{P_\nu}{p} = \psi\left(1-e^{-\frac{t_\nu}{T}}\right)\cdot I_{kr}^2\cdot R_1\cdot\frac{K}{\vartheta}\cdot\frac{R_\nu - R_{\nu-1}}{R_1} \qquad 245$$

По значению этой величины, найденному для каждой ступени, можно выяснить необходимое количество материала для сопротивления.

Множитель $I_{kr}^2\cdot R_1$, входящий в выражение для P_ν, можно преобразовать следующим образом:

$$I_{kr}^2\cdot R_1 = \frac{I_{kr}}{I_{2r}}\cdot\frac{E_{2kr}}{E_{or}}\cdot I_{kr}\cdot E_{or} = \operatorname{ctg}\beta_o\cdot\frac{2}{3}\cdot D_m\cdot\omega_s = \frac{4}{3}\cdot\operatorname{ctg}\beta_o\cdot\frac{A_s}{T'_k},$$

и так как кроме того

$$\frac{R_{\nu-1}}{R_\nu} = \frac{\lambda}{\varepsilon}$$

и

$$R_\nu = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} \cdot R_1,$$

то

$$P_r = \phi \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_\nu}{T}}\right) \cdot \frac{4}{3} \operatorname{Cotg} \beta_o \cdot \frac{A_s}{T_k} \cdot \frac{K}{\vartheta} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon}{\lambda}\right)\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1}. \qquad 246$$

Как известно, для больших значений T выражение

$$\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

можно с большим приближением положить равным $\frac{t_\nu}{T}$.

Если кроме того принять во внимание, что

$$t_\nu = T_k \cdot \vartheta \cdot \operatorname{Cotg} \beta_o \cdot \frac{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^\nu}{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)},$$

то выражение для P_ν получает вид:

$$P_\nu = \phi \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{T_w} \cdot \operatorname{Cotg}^2 \beta_o \cdot K \cdot A_s \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right]. \qquad 247$$

Полную теплоемкость ν-й ступени, равную

$$Q_\nu = P_\nu \cdot T,$$

можно выразить так:

$$Q_\nu = \phi \cdot \frac{4}{3} \cdot \operatorname{Cotg}^2 \beta_o \cdot K \cdot A_s \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right]. \qquad 248$$

Если просуммировать это выражение для всех ступеней сопротивления от $\nu = 1$ до $\nu = m - 1$, то получается выражение для общей теплоемкости сопротивления одной фазы. Помножив это выражение на 3, можно получить общую теплоемкость сопротивления для трех фаз, при условии равенства сопротивлений во всех трех фазах:

$$Q = 4 \cdot \phi \cdot K \cdot A_s \cdot Cotg^2 \beta_o \sum_{\nu=1}^{m-1} \left[\left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{2\nu-1}\right].$$

В результате суммирования получается:

$$Q = 4 \cdot \phi \cdot K \cdot A_s \cdot \operatorname{Cotg}^2 \beta_o \cdot \frac{\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^m\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1}\right]}{\left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right]}. \qquad 249$$

Подставив вместо R_m соответствующее выражение:

$$R_m = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1} \cdot R_1,$$

можно получить:

$$Q = 4 \cdot \psi \cdot \mathrm{K} \cdot A_s \cdot \operatorname{Cotg}^2 \beta_o \frac{\left[1 - \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot \frac{R_m}{R_1}\right] \cdot \left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right]}{1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2}.$$

После подстановки

$$\mathrm{K}_o = \frac{1}{4} \cdot \operatorname{tg}^2 \beta_o \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right]$$

получается:

$$Q = \psi \cdot \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{K}_o} \cdot A_s \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot \frac{R_m}{R_1}\right] \cdot \left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right].$$

Далее, если принять во внимание, что

$$\frac{R_m}{R_1} = \frac{j \cdot \lambda}{\varepsilon_n}(1 - \eta),$$

то

$$Q = \psi \cdot \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{K}_o} \cdot A_s \cdot \left[1 - \frac{\varepsilon \cdot j}{\varepsilon_n} \cdot (1 - \eta)\right] \cdot \left[1 - \frac{j \cdot \lambda}{\varepsilon_n}(1 - \eta)\right]. \qquad 250$$

Для однократного пуска в ход двигателя вхолостую (нагрузочный момент равен нулю, или $\alpha = 0$ и период покоя велик: $t_b = \infty$ или $\psi = 1$) и при условии, что двигатель не имеет потерь ($\eta = 1$, $R_m = 0$)

$$Q_o = A_s,$$

т. е. энергия, поглощаемая пусковым сопротивлением, равна кинетической энергии вращающихся частей двигателя.

§ 50. Пример расчета пускового реостата для трехфазного асинхронного двигателя.

Данные двигателя:

Номинальная мощность $P_n = 25$ *kW*.

Число фаз $m = 3$.

Напряжение сети $E_{ks} = 500$ *V*.

Частота тока $f = 50$ sec^{-1}.

Скорость вращения $n = 1\,450$ ($n_s = 1\,500$ *об./мин*).

Коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}895$.

Соединение обмоток:

статора — в звезду,

ротора — в звезду.

Сопротивление фазовой обмотки ротора $R_m = 0{,}015\ \Omega$.

Маховой момент ротора и сцепленных с ним вращающихся частей $GD^2 = 20\ kgm^2$.

Данные опыта:

Холостого хода.

Сила тока статора $I_{so} = 8A$.

Напряжение ротора $E_{or} = 140\ V$.

Короткого замыкания.

Напряжение короткого замыкания $E_{sk} = 80\ V$.

Сила тока „ „ $I_{sk} = 20A$.

Коэффициент мощности $\cos\varphi_k = 0{,}3$.

Условия пуска в ход двигателя.

Нагрузочный момент в течение пуска постоянен и равен номинальному вращающему: т. е. $M = D_n$.

Отношение максимального пускового тока к номинальному току ротора $j_2 = \frac{I_{2r}}{I_{nr}} = 1{,}58$.

Отношение тока переключения к номинальному току ротора $j_1 = \frac{I_{1r}}{I_{nr}} = 1{,}08$.

Требования, предъявляемые к реостату.

Охлаждение воздушное.

Число включений $Z \geqslant 3$.

Частота включений $f_h \leqslant 5$.

Число предварительных ступеней $n = 3 \times 1$.

Отношение тока включения к номинальному току ротора $\frac{I_{re}}{I_{nr}} = 0{,}9$.

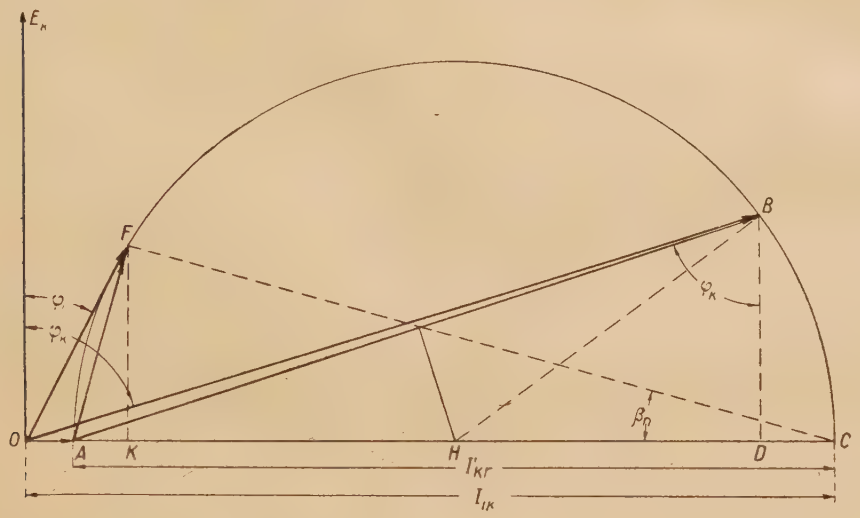
Вначале определяют идеальный ток короткого замыкания ротора I_{kr}, для чего строится диаграмма токов (см. фиг. 155). По горизонтали откладывается вектор силы тока холостого хода $\dot{I}_{os} = \overline{OA}$; под углом $\varphi_k = \arccos 0{,}3$ к перпендикуляру $\overline{OE_k}$ проводят луч прямой, на котором откладывают отрезок $\overline{OB}$, представляющий вектор первичной силы тока короткого замыкания:

$$I_{ks} = \frac{500}{80} \cdot 20 = 125\ A.$$

Соединяя точки A и B, получают отрезок $\overline{AB}$, который очевидно представляет собою приведенный ток короткого замыкания ротора. Восставляя из середины отрезка $\overline{AB}$ перпендикуляр и проводя его до пересечения с продолжением вектора $\overline{OA}$, находят центр H круга. Диаметр полученного круга $\overline{AC}$ представляет вектор идеального тока

короткого замыкания ротора, а отрезок $\overline{OC}$ — вектор идеального тока короткого замыкания статора.

Из рассмотрения чертежа фиг. 155 видно, что $\overline{HD} = \overline{OD} - \overline{OA} - \overline{AH}$ и $\overline{HD}^2 + \overline{DB}^2 = \overline{HB}^2$.



Фиг. 155.

Так как

$$\overline{OA} = \overline{OB} \cdot \sin \varphi_k,$$

$$\overline{OA} = I_{os},$$

$$\overline{AH} = \frac{I'_{kr}}{2},$$

$$\overline{HB} = \overline{AH},$$

то

$$\left(I_{ks} \sin \varphi_k - I_{os} - \frac{I_{kr}'}{2}\right)^2 + (I_{ks} \cos \varphi_k)^2 = \left(\frac{I'_{kr}}{2}\right)^2,$$

откуда

$$I'_{kr} = I_{ks} \frac{I_{ks} - I_{os} \sin \varphi_k}{I_{ks} \sin \varphi_k - I_{os}} - I_{os};$$

для разбираемого примера

$$I_{ks} = 125\ A,$$

$$I_{os} = 8{,}0\ A,$$

$$\sin \varphi_k = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_k} = \sqrt{1 - 0{,}3^2} = \sqrt{0{,}91},$$

так что после подстановки

$$I'_{kr} = 125\ \frac{1{,}25 - 8 \cdot \sqrt{0{,}91}}{125\sqrt{0{,}91} - 8} - 8 = 124{,}2\ A,$$

что совпадает со значением, полученным непосредственно из чертежа фиг. 155 по отрезку $A\overline{C}$.

Так как последняя величина соответствует напряжению статора 500 V, то пересчет на напряжение ротора дает:

$$I_{kr} = I'_{kr}\frac{E_{ks}}{E_{or}} = 124{,}2\,\frac{500}{140} = 444\ A.$$

Это, таким образом, и есть значение тока идеального короткого замыкания ротора.

Пользуясь построенной круговой диаграммой токов, находят значение номинального тока ротора I_{rn}. С этой целью, приняв точку O за центр, описывают радиусом OF, равным I_{ns}, дугу окружности, а затем точку пересечения этой дуги с кругом Гейланда соединяют с точкой A и получают $\overline{AF} = I'_{nr}$. Значение силы тока I'_{nr} можно определить и аналитически следующим образом: фиг. 155 показывает,

$$I_{nr}' = \overline{AF} = \overline{AC}\sin\beta_n = I_{kr}'\sin\beta_n$$

$$\sin\beta_n = \frac{\overline{FK}}{\overline{FC}} = \frac{\overline{OF}\cos\varphi_1}{AC\cos\beta_n} = \frac{I_{sn}\cos\varphi_1}{I_{kr}'\cos\beta_n},$$

что отсюда

$$\sin\beta_n\cdot\cos\beta_n = \frac{I_{ns}}{I_{kr}'}\cos\varphi_1,$$

или

$$\sin 2\beta_n = \frac{I_{ns}}{2I_{kr}'}\cos\varphi_1;$$

$\cos\varphi_1$ может быть определен графически или вычислен по формуле

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_n}{\eta\cdot\sqrt{3}E_{ks}I_{sn}}.$$

Для рассматриваемого случая

$$\cos\varphi_1 = \frac{25\,000}{0{,}89\sqrt{3}\,500\cdot 36{,}4} = 0{,}892,$$

$$\sin 2\beta_n = \frac{36{,}4}{2\cdot 124{,}2}\,0{,}892 = 0{,}1305,$$

$$\beta_n = 3^\circ 44' 57'',$$

$$\sin\beta_n = 0{,}06539$$

и

$$I_{nr}' = I_{kr}'\sin\beta_n = 444\cdot 0{,}06539 = 29{,}1\ A.$$

На основании этих выводов и условий задания получают ток переключения в цепи ротора:

$$I_{1r} = j_2 \cdot I''_{rn} \frac{E_{ks}}{E_{or}} = 1{,}08 \cdot 29{,}1 \cdot \frac{500}{140} = 112\ A,$$

и максимальный пусковой ток:

$$I_{2r} = j_2 \cdot I''_{rn} \frac{E_{ks}}{E_{or}} = 1{,}58 \cdot 29{,}1 \frac{500}{140} = 164\ A.$$

По найденным значениям I_{1r} и I_{2r} вычисляют значения E_{1kr} и E_{2kr}

$$E_{1kr2} = \frac{E_{or}}{I_{kr}} \cdot \sqrt{I_{kr}^2 - I_{1r}^2} = \frac{140}{\sqrt{3}\,444} \sqrt{444^2 - 112^2} = 78{,}5\ \text{N}$$

$$E_{2kr} = \frac{E_{or}}{I_{kr}} \sqrt{I_{kr}^2 - I_{2r}^2} = \frac{140}{\sqrt{3}\,444} \sqrt{444^2 - 164^2} = 75{,}1\ \text{N}$$

где, как и во всех формулах, E_{or} есть фазовое напряжение, равное

$$E_{or} = \frac{140}{\sqrt{3}}$$

и

$$\varepsilon = \frac{E_{2kr}}{E_{1kr}} = \frac{75{,}1}{78{,}5} = 0{,}957.$$

Далее определяется опрокидывающий момент:

$$D_m = \frac{3}{2} \frac{I_k \cdot E_{or}}{\omega_s} = \frac{3}{2} \frac{444 \cdot 60 \cdot 140}{2\pi\, 1\,500\, \sqrt{3}} = 344\ \textit{Joule},$$

и отношение пусковых моментов к опрокидывающему

$$\frac{D_2}{D_m} = 2 \frac{I_{2r}}{I_{kr}} \frac{E_{2kr}}{E_{or}} = 2 \frac{16475{,}1\ \sqrt{3}}{444 \cdot 140} = 0{,}684$$

$$\frac{D_1}{D_m} = 2 \frac{I_{1r}}{I_r} \frac{E_{1kr}}{E_{or}} = 2 \frac{112 \cdot 78{,}5\ \sqrt{3}}{444 \cdot 140} = 0{,}490.$$

В начале пуска в ход двигателя напряжение ротора E_{2kr} равно:

$$E_{2kr} = I_{2r} \cdot R_1.$$

Отсюда общее сопротивление пусковой цепи:

$$R_1 = \frac{E_{2kr}}{I_{2r}} = \frac{75{,}1}{164} = 0{,}458\ \Omega.$$

Число ступеней реостата определяется из равенства:

$$R_m = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{m-1} \cdot R_1,$$

где

$$\lambda = \frac{I_{2r}}{I_{1r}} = \frac{j_2}{j_1} = \frac{1{,}58}{1{,}08} = 1{,}46,$$

откуда

$$m - 1 = \frac{\ln \frac{R_1}{R_m}}{\ln \frac{\lambda}{\varepsilon}} = \frac{\ln \frac{0{,}458}{0{,}015}}{\ln \frac{1{,}46}{0{,}957}} = 8.$$

Таким образом для данного двигателя необходим реостат с восемью ступенями или с девятью контактами в каждой фазе.

Теперь легко рассчитать сопротивление каждой отдельной ступени реостата.

Сопротивление пусковой цепи для ν-го положения подвижного контакта выражается формулой:

$$R_\nu = \left(\frac{\varepsilon}{\lambda}\right)^{\nu-1} \cdot R_1;$$

для данного примера:

$$R_1 = 0{,}458\ \Omega$$

$$R_2 = \left(\frac{0{,}957}{1{,}46}\right)^{2-1} \cdot 0{,}458 = 0{,}30\ \Omega;$$

аналогично и для остальных положений определяются:

$$R_3 = 0{,}1965\ \Omega,$$
$$R_4 = 0{,}128\ \Omega,$$
$$R_5 = 0{,}0844\ \Omega,$$
$$R_6 = 0{,}0553\ \Omega,$$
$$R_7 = 0{,}0362\ \Omega,$$
$$R_8 = 0{,}0238\ \Omega,$$
$$R_9 = R_m = 0{,}015.$$

Сопротивления отдельных ступеней составляют:

$$r_1 = R_1 - R_2 = 0{,}458 - 0{,}30 = 0{,}158\ \Omega$$
$$r_2 = R_2 - R_3 = 0{,}30 - 0{,}1970 = 0{,}103\ \Omega$$
$$r_3 = R_3 - R_4 = 0{,}197 - 0{,}128 = 0{,}069\ \Omega$$
$$r_4 = R_4 - R_5 = 0{,}128 - 0{,}0844 = 0{,}036\ \Omega$$
$$r_5 = R_5 - R_6 = 0{,}0844 - 0{,}0553 = 0{,}0291\ \Omega$$
$$r_6 = R_6 - R_7 = 0{,}0553 - 0{,}0362 = 0{,}0191\ \Omega$$
$$r_7 = R_7 - R_8 = 0{,}0362 - 0{,}0238 = 0{,}0124\ \Omega$$
$$r_8 = R_8 - R_m = 0{,}0238 - 0{,}015 = 0{,}0088\ \Omega$$

Всего 0,4354 Ω

Для полного расчета пускового реостата необходимо также определить время, в течение которого каждая ступень находится под нагрузкой. Этот расчет производится по вышеприведенной формуле 226:

$$t_\nu = t_{\nu-1} + T_k \cdot \sigma_{m\nu} \cdot \vartheta.$$

Откуда следует необходимость определения значения ϑ. Для нахождения ϑ в свою очередь необходимо знание величины y для определенных значений x:

$$x_\nu = \frac{\sigma_\nu}{\sigma_{m\nu}} \text{ и } x_{\nu-1} = \frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}},$$

так как

$$\vartheta = y(x_\nu) - y(x_{\nu-1}).$$

Для начального и конечного моментов включения каждой ступени действительны равенства:

$$I_{2r} \cdot R_\nu = \sigma_{\nu-1} E_{2kr}$$

$$\frac{I_{2r}}{\lambda} R_\nu = \sigma_\nu \frac{E_{2kr}}{r}.$$

Из сравнения этих равенств с

$$\sigma_{m\nu} = \frac{I_{kr} \cdot R_\nu}{E_{or}}$$

можно получить:

$$\frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}} = \frac{I_{2r}}{I_{kr}} \cdot \frac{E_{or}}{E_{2kr}}; \quad \frac{\sigma_\nu}{\sigma_{m\nu}} = \frac{\varepsilon}{\lambda} \cdot \frac{I_{2r}}{I_{kr}} \frac{E_{or}}{E_{2kr}}.$$

После подстановки соответствующих значений:

$$\varepsilon,\ \lambda,\ I_{2r},\ I_{kr},\ E_{or} \text{ и } E_{2kr}$$

получается

$$x_{\nu-1} = \frac{\sigma_{\nu-1}}{\sigma_{m\nu}} = \frac{164}{444} \frac{140}{\sqrt{3 \cdot 75{,}1}} = 0{,}397$$

$$x_\nu = \frac{0{,}957}{1{,}46} \cdot \frac{164}{444} \frac{140}{\sqrt{3.751}} = 0{,}260.$$

Для определения величины a, входящей в выражение для y, необходимо определить нормальный вращающий момент D_n.

Он равен:

$$D_n = \frac{P}{\omega_n} = \frac{25000.60.}{2\pi\, 1450} = 165 \ \textit{Joule},$$

так что

$$a = \frac{D_n}{D_m} = \frac{165}{344} = 0{,}480;$$

подставляя найденные значения для α, x_ν и $x_{\nu-1}$ в выражение для y, получают для $x_{\nu-1}$

$$y_1 = \frac{x_{\nu-1}}{\alpha} + \frac{2}{\alpha^2\sqrt{1-\alpha^2}} \ln \frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1-\alpha^2} - \alpha\, x_{\nu-1}\right) -$$

$$-\frac{1}{\alpha^2}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} - 1\right) \ln\left(2x_{\nu-1} - \alpha - \alpha x^2_{\nu-1}\right) =$$

$$= \frac{0{,}397}{0{,}48} + \frac{2}{0{,}48^2\sqrt{1-0{,}48^2}} \ln \frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1-0{,}48^2} - 0{,}48\cdot 0{,}397\right) -$$

$$-\frac{1}{0{,}48^2}\left(\frac{1}{\sqrt{1-0{,}48^2}} - 1\right) \ln\left(2.0{,}397 - 0{,}48 - 0{,}48.0{,}397^2\right) = -0{,}003.$$

Аналогично вычисляется и y для x_ν; формула для подсчета остается той же, только в ней заменяется значение $x_{\nu-1}$ на x_ν.

В результате вычислений получается для x_ν $y_2 = 1{,}26$, так что окончательно

$$\vartheta = y_2 - y_1 = 1{,}26 + 0{,}003 = 1{,}263.$$

Время прохождения тока через первую ступень определяется по формуле $t_1 = T_k \sigma_{m1} \vartheta$.

Здесь

$$\alpha_{m1} = \frac{I_{kr}\cdot R_1}{E_{or}} = \frac{444\cdot 0{,}458\sqrt{3}}{140} = 2{,}52$$

и

$$T_k = \frac{\Theta\omega_s}{D_m}.$$

В условиях задания указан не момент инерции вращающихся масс, а их маховой момент, равный, как известно, GD^2, — то, как это легко понять,

$$\Theta = m\cdot r^2 = \frac{G}{g}\cdot\left(\frac{D}{2}\right)^2$$

причем R и D — радиус и диаметр инерции, а G — масса вращающихся частей.

Легко видеть, что момент инерции можно выразить в $Joul\cdot sec^2$:

$$\Theta = m\cdot r^2 = \frac{G}{9{,}81}\cdot\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{G}{9{,}81}\cdot\frac{D^2}{4}\,\frac{kg.m^2}{m/sec^2} = \frac{GD^2}{4}\ Joule\cdot sec^2.$$

Таким образом для данного примера можно написать:

$$\Theta = \frac{GD^2}{4} = \frac{20}{4} = 5\ Joule \cdot sec^2.$$

Далее, так как

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot n_s}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 50\pi,$$

то постоянная времени разбега выразится

$$T_m = \frac{\Theta \cdot \omega_s}{D_m} = \frac{5 \cdot 50\pi}{344} = 2{,}28\ sec.$$

После подстановки найденных значений в выражение для t_1, получается:

$$t_1 = 2{,}28 \cdot 2{,}52 \cdot 1{,}263 = 7{,}25\ sec.$$

Время, в течение которого находится под током вторая ступень

$$t_2 = t_1 + T_m \cdot \sigma_{m2} \cdot \vartheta,$$

где

$$\sigma_{m2} = \frac{I_{kr} R_2}{E_{or}} = \frac{4440{,}3 \cdot \sqrt{3}}{140} = 165,$$

и следовательно:

$$t_2 = 7{,}25 + 2{,}28 \cdot 1{,}65 \cdot 1{,}263 = 11{,}95\ sec.$$

Аналогичным путем находятся времена, в течение которых находятся под током и остальные ступени, т. е.

$$t_3 = 15{,}06\ sec$$
$$t_4 = 17{,}08\ \text{„}$$
$$t_5 = 18{,}42\ \text{„}$$
$$t_6 = 19{,}29\ \text{„}$$
$$t_7 = 19{,}86\ \text{„}$$
$$t_8 = 20{,}24\ \text{„}$$
$$t_m = 20{,}48\ \text{„}$$

Зная сопротивление отдельных ступеней, время, в течение которого находится под током каждая ступень реостата, можно определить теплоемкость отдельных ступеней.

Теплоемкость ν-й ступени выражается, как известно, уравнением:

$$Q_\nu = P_\nu \cdot T = \psi I_{kr}^2 \frac{K}{\vartheta} t_\nu (R_\nu - R_{\nu+1}),$$

где, как выше было указано,

$$K = z(x_\nu) - z(x_{\nu-1})$$

и

$$z = \frac{x}{a} = \frac{2-a^2}{a^2\sqrt{1-a^2}} \ln \frac{1}{2}\left(1+\sqrt{1-a^2}-ax\right) -$$

$$-\frac{(1-\sqrt{1-a^2})^2}{2a^2\sqrt{1-a^2}} \ln\left(2x-a-ax^2\right);$$

величины a и x приведены выше и имеют те же значения, что и при вычислении ϑ.

После подстановки значений величин x и a в выражение для z получаются два значения:

для $x_{\nu-1}$ $\quad z_1 = -0{,}768$

для x_ν $\quad z_2 = -0{,}655.$

Так что

$$K = z_2 - z_1 = -0{,}655 + 0{,}768 = 0{,}113.$$

Реостат, как было указано в задании, предназначается для пуска в ход с частотой включений $f_h = 5$.

Таким образом

$$t_a + t_r = 12 \ min.$$

Далее пусть выбран реостат с постоянной времени нагрева $T = 12 min$, что соответствует устройству элементов сопротивления в виде проволоки, навернутой на раму.

Тогда

$$\psi = \frac{1}{1-e^{-\frac{t_a+t_r}{T}}} = \frac{1}{1-e^{-\frac{12}{12}}} = \frac{1}{0{,}632} = 1{,}58;$$

так как $R_1 - R_2 = 0{,}158\,\Omega$, то теплоемкость первой ступени выразится

$$Q_1 = 1{,}58 . 444^2 \frac{0{,}113}{1{,}263}\, 7{,}25 \cdot 0{,}158 . 10^{-3} = 31{,}8 \ k\,Joule.$$

Аналогично этому подсчитываются теплоемкости для всех остальных ступеней реостата и принимают значения:

$Q_2 = 34{,}4$ *k Joule*

$Q_3 = 29{,}1$ „

$Q_4 = 17{,}2$ „

$Q_5 = 15{,}0$ „

$Q_6 = 10{,}3$ „

$Q_7 = 6{,}86$ „

$Q_8 = 4{,}98$ „

Таким образом данные расчета реостата можно представить в виде таблицы 27.

Таблица 27

ν	1	2	3	4	5	6	7	8	9 (m)
R_ν	0,458	0,30	0,1965	0,128	0,0844	0,0553	0,0362	0,0238	0 015
$R_\nu - R_{\nu+1}$	0,158	0,103	0,069	0,036	0,0291	0,0191	0,0124	0,0088	—
t_ν	7,25	11,95	15,06	17 08	18,42	19,29	19,86	20,24	20,48
Q_ν	31,8	34,4	29,1	17,2	15,0	10,3	6,86	4,98	—

Полученные величины времени пуска в ход двигателя и общую теплоемкость реостата можно проконтролировать при помощи уравнений, выведенных для общего времени пуска двигателя и общей теплоемкости.

В самом деле, t_m, полученное при подсчете, равно:

$$t_m = 20{,}48 \ sec.$$

С другой стороны

$$t_m = T_m \cdot \vartheta \cdot \operatorname{cotg} \beta_o \frac{\lambda - \varepsilon \frac{R_m}{R_1}}{\lambda - \varepsilon},$$

где

$$\operatorname{cotg} \beta_o = \frac{I_{kr} \cdot R_1}{E_{or}} = \frac{444 \cdot 0{,}458 \cdot \sqrt{3}}{140} = 2{,}52.$$

При подстановке значений получают:

$$t_m = 1{,}263 \cdot 2{,}28 \cdot 2{,}52 \frac{1{,}46 - 0{,}957 \frac{0{,}015}{0{,}458}}{1{,}46 - 0{,}957} = 20{,}5 \ sec.$$

Это доказывает, что определение величины t_m произведено правильно.

Общая теплоемкость фазы реостата, полученная при расчете, выразится:

$$Q = 31{,}8 + 34{,}4 + 29{,}1 + 17{,}2 + 15{,}0 + 10{,}3 + 6{,}86 + \\ + 4{,}98 = 149{,}7 \ k\,Joule.$$

С другой стороны общая теплоемкость всего реостата выражается:

$$Q = \psi \frac{K}{K_o} A_s \left[1 - \frac{\varepsilon}{\lambda} \frac{R_m}{R_1}\right] \left[1 - \frac{R_m}{R_1}\right],$$

где

$$K_o = \frac{1}{4}\,\mathrm{tg}^2\,\beta_o\left(1 - \frac{\varepsilon_2}{\lambda_2}\right) = \frac{1}{42{,}52^2}\left[1 - \frac{0{,}957^2}{1{,}46^2}\right] = 0{,}021$$

$$A_s = \frac{1}{2}\,\theta\omega_s^2 = \frac{5}{2}\left(\frac{2\pi\cdot 1500}{60}\right)^2 = 61{,}5\ k\ Joule.$$

Таким образом общая теплоемкость получается равной:

$$Q = 1{,}58\,\frac{0{,}113}{0{,}021}\,61{,}5\left[1 - \frac{0{,}957}{1{,}46}\,\frac{0{,}015}{0{,}458}\right]\left[1 - \frac{0{,}015}{0{,}458}\right] = 455{,}5\ k\ Joule.$$

Полученная при расчете общая теплоемкость реостата для всех трех фаз составляет:

$$Q = 149{,}7 \times 3 = 449{,}1\ k\ Joule,$$

т. е. получается достаточно близкая величина.

Если известна теплоемкость отдельных ступеней реостата, то нетрудно подсчитать необходимое количество материала для каждой ступени, как, например, это делалось при расчете пускового реостата постоянного тока.

*

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

РАСЧЕТ ЖИДКОСТНЫХ РЕОСТАТОВ С ПЕРЕМЕЩАЮЩИМСЯ УРОВНЕМ ЖИДКОСТИ *

*

При пуске в ход больших асинхронных двигателей (например свыше 1 000 *kW*), т. е. когда пусковая поглощаемая мощность относительно велика, применение металлических пусковых реостатов становится затруднительным, с одной стороны, ввиду их значительных размеров — с другой, — в особенности при частых пусках, вследствие обгорания и быстрого износа контактов переключателя ступеней.

Сравнительно недавно думали, что мощность двигателей, пускаемых при помощи пусковых реостатов, в 1 500 *kW* является пределом из-за тех трудностей, которые приходилось преодолевать при построении контактного переключателя к металлическому пусковому реостату. Выходом, однако, из создавшегося положения явились жидкостные реостаты, которые в качестве пусковых строятся в настоящее время без особых затруднений для асинхронных двигателей мощностью до 2 500 *kW* (шахтные подъемники, прокатные станы и пр.).

Для двигателей постоянного тока пусковые жидкостные реостаты на большую мощность почти не применяются вследствие — во-первых, относительно быстрого износа электродов, во-вторых — образования и скопления в рабочем баке реостата большого количества гремучего газа, легко взрывающегося от искры, возникающей при отрыве электродов от жидкости, что в свою очередь ведет к короткому замыканию реостата.

Указанные причины настолько серьезны и резко проявляются при постоянном токе, что в настоящее время от применения жидкостных реостатов для пуска мощных двигателей постоянного тока пришлось отказаться. При переменном токе разъедание электродов и образование гремучего газа проявляются в значительно меньшей степени,

---

* Эта глава составлена инж. Ю. В. Буткевичем.

нежели при постоянном токе. Таким образом пусковые и пуско-регулирующие жидкостные реостаты в установках с крупными асинхронными двигателями явились достаточно надежными аппаратами и получили в последнее время широкое распространение, особенно в установках, требующих частых пусков или перемены направления вращения двигателя.

Жидкостный реостат представляет собою аппарат, где роль сопротивления играет обычно раствор солей в воде, находящийся между рабочими поверхностями реостата — электродами. Изменение сопротивления достигается посредством либо перемещения электродов при неподвижном уровне жидкости, либо посредством перемещения уровня жидкости при неподвижных электродах; причем последний вид реостатов применяется в тех случаях, когда реостат получает сравнительно большие размеры и перемещение электродов вследствие их значительного веса является неудобным и нерациональным.

Так как растворы или электролиты обладают свойством в сильной степени изменять свое сопротивление с температурой и концентрацией, то при осуществлении пуска в ход двигателя по строго определенному закону изменения скорости вращения и крутящего момента является весьма важным учесть в совокупности все факторы, имеющие место в реостате во время пуска в ход двигателя.

Ниже приводится расчет пускового жидкостного реостата с перемещающимся уровнем жидкости.

Реостаты с перемещающимся уровнем жидкости состоят обычно из двух, расположенных друг над другом, баков, причем электроды помещаются в верхнем рабочем баке, куда жидкость подается посредством насоса из нижнего бака. Регулирование высоты уровня жидкости производится посредством особой перемещающей радиальной или плоской заслонки, как это было указано на фиг. 45.

Обычно подаваемая в верхний бак жидкость достаточно хорошо все время смешивается с находящейся там нагретой жидкостью, поэтому в нижеприведенных выводах сделано допущение, что температура нагрева жидкости в верхнем баке распределяется равномерно по всему объему, и, кроме того, что вся энергия, поглощаемая реостатом при пуске в ход двигателя, идет на повышение температуры электролита.

Чтобы иметь возможность правильно подойти к вопросу выбора того или иного электролита и учесть изменение его удельного сопротивления (или проводимости) в реостате с температурой нагрева во время пуска в ход двигателя, необходимо иметь основные, экспериментально полученные, характеристики растворов.

К основным характеристикам электролитических растворов, следует отнести зависимость их удельного сопротивления, во-первых, от концентрации, во-вторых — от температуры жидкости.

На фиг. 52 и 53 были представлены зависимости удельного сопротивления в $\frac{\Omega mm^2}{m}$ и удельной проводимости в $\frac{\Omega m}{mm^2}$ от концентрации (в процентах по весу) при различных температурах жидкости для наиболее употребительного в реостатах раствора соды (Na_2CO_3).

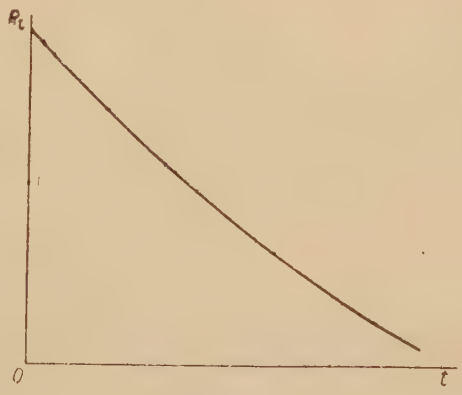
Как видно, зависимости удельного сопротивления от концентрации при различных температурах имеют характер, близкий к гиперболе, и следовательно, обратные им кривые — зависимости проводимости от концентрации — приближаются к прямым линиям. Так как совершенно чистая, лишенная каких бы то ни было примесей вода не является практически проводником, то последние сходятся почти в начале координат.

Характеристики показывают, что влияние температуры раствора на его удельное сопротивление настолько значительно, что при построении формы электрода жидкостных реостатов с ним приходится считаться, в особенности в тех случаях, где изменение сопротивления во время пуска в ход двигателя должно протекать по вполне определенному закону.

§ 53. Нагревание реостата. — Сопротивление реостата может быть выражено в общем виде, как некоторая функция времени, уравнением:

$$R_t = f(t),$$

или графически в виде кривой (фиг. 156).



Фиг. 156.

Мощность, поглощаемая реостатом, для любого момента времени пуска в ход равна:

$$P_t = I^2 \cdot R_t.$$

Для трехфазного тока

$$P_t = 3I^2 \cdot R_t,$$

где R_t и I — сопротивление и сила тока фазовой цепи реостата.

Энергия, поглощенная реостатом за период времени t от начала пуска в ход двигателя, обращенная в тепло, выражается для трехфазного тока таким образом:

$$A_t = \int_0^t P_t \cdot dt = 3\int_0^t I^2 \cdot R_t dt. \qquad 251$$

В частном случае, когда пусковой ток I и отношение нагрузочного момента к моменту, развиваемому двигателем $M/D = a$, в течение всего времени пуска остаются постоянными, сопротивление фазовой цепи ротора асинхронного двигателя, включая реостат в зависимости от времени, представляется в виде уравнения

$$\frac{R_t'}{R_1} = 1 - \eta\,(1 - a)\,\frac{t}{T_s}, \qquad 252$$

где R_1 — начальное пусковое сопротивление ($t = 0$) фазовой цепи ротора;

η — коэффициент полезного действия для номинальных условий работы двигателя;

a — отношение нагрузочного момента к общему моменту, развиваемому двигателем;

T_s — постоянная времени разбега.

Таким образом в этом случае сопротивление фазовой цепи ротора представляет собою прямолинейную зависимость от времени, т. е.

$$\frac{R_t'}{R_1} = 1 - Ct, \qquad 253$$

где C — постоянная, равная $\frac{T_s}{\eta\,(1 - a)}$.

Фазовое же сопротивление реостата равняется:

$$R_t = R_t' - R_a = (R_1 - R_a) - R_1 \cdot C \cdot t \qquad 254$$

(где R_a — сопротивление фазовой обмотки ротора двигателя), а энергия, поглощаемая трехфазным реостатом за время t от начала пуска в ход двигателя, определяется следующим образом:

$$A_t = \int_0^t P_t dt = 3I^2 \int_0^t (R'_t - R_a - R_1 \cdot C \cdot t)\, dt =$$

$$= 3I^2 (R_1 - R_a)\, t - \frac{3}{2} I^2 \cdot R_1 \cdot C \cdot t^2. \qquad 255$$

Если далее обозначить посредством V_t объем жидкости верхнего бака в момент времени t, то повышение температуры раствора может быть выражено в общем виде, при допущении, что жидкость по всему объему имеет одно и то же значение температуры при помощи равенства:

$$\tau_t = \frac{A_t}{q \cdot \gamma \cdot V_t} = \frac{\int_0^t P_t dt}{q \cdot \gamma \cdot V_t}, \qquad 256$$

где q — теплоемкость раствора.

Для водных растворов принимается

$$q = 4{,}189 \frac{Joule}{kg^{o} \cdot C}.$$

V_t — объем жидкости,

γ — удельный вес (для водных растворов $\gamma = 1\ kg/dm^3$).

Объем жидкости в верхнем баке, соответствующий моменту времени t, составляется в общем случае из постоянного предварительного объема V_o, находящегося в верхнем баке до начала пуска в ход двигателя, и объема переменного, подаваемого в верхний бак в течение пуска. Последний можно представить как произведение из подачи жидкости в единицу времени и времени, протекшего с начала пуска в ход.

Таким образом

$$V_t = V_o + w_1 \cdot t, \qquad 257$$

тогда и уравнение 256 можно преобразовать в следующий вид:

$$\tau_t = \frac{\int_0^t P_t dt}{q \cdot \gamma \cdot (V_0 + w_1 \cdot t)}. \qquad 258$$

Для случая $I = Const$ и $\frac{M}{D} = \alpha = Const$

$$\tau_t = \frac{3 I^2 (R_1 - R_a) t - \frac{3}{2} I^2 \cdot R_1 \cdot C.t^2}{q \cdot \gamma \cdot (V_o + w_1 t)}. \qquad 259$$

Если энергия, поглощенная реостатом, не выражается просто каким-либо аналитическим выражением, то $\tau_t = f(t)$ можно получить непосредственно из графически нанесенных зависимостей:

$$A_t = \varphi(t) \text{ и } V_t = V_o + w_1 \cdot t,$$

путем деления для каждого момента времени значения A_t на $q \cdot \gamma \cdot V_t$ $\left(\text{где } q \cdot \gamma = Const. \text{ Для водных растворов } q \cdot \gamma = 4{,}189 \frac{kJ}{^{o}C.l}\right)$.

Если заранее задаться предварительным объемом жидкости V_0, то для определения зависимости $V_t = \psi(t)$ необходимо еще знать величину подачи w_1.

Величина подачи w_1 из условий предельного нагрева жидкости может быть в общем случае определена следующим образом:

Из уравнения 258 следует, что

$$q \cdot \gamma \cdot (V_0 + w_1 \cdot t) \tau_t = A_t$$

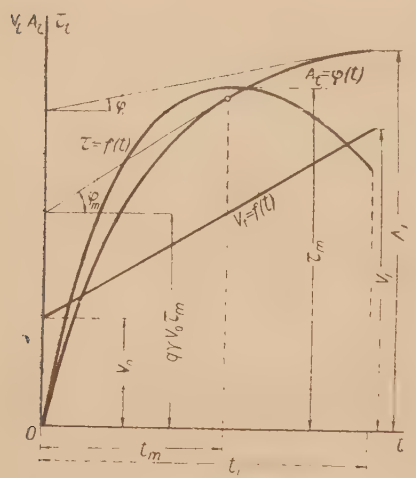
и

$$\frac{dA_t}{dt} = q \cdot \gamma \cdot (V_0 + w_1 t) \frac{d\tau_t}{dt} + \tau_t \cdot w_1 \cdot q \cdot \gamma; \qquad 260$$

после замены величины τ_t на его максимальное значение τ_m последнее уравнение примет вид

$$P_{tm} = \frac{dA_t}{dt} = \tau_m \cdot w_1 \cdot q \cdot \gamma, \text{ так как } \frac{d\tau_m}{dt} = 0. \qquad 261$$

Но это равенство представляет собою значение угла касательной к кривой $A_t = f(t)$ в некоторой точке (A_m, t_m) (фиг. 157), уравнение которой можно написать в общем виде следующим образом: $y = a + bt$.



Фиг. 157.

Если решить его совместно с выражением 258 для точки, (A_m, t_m), т. е. $a + \tau_m\ w_1\, q\gamma\, t_m = q\gamma\,(V_0 t + w_1 t)\,\tau_m$, то отрезок, отсекаемый касательной на оси ординат, представит собою не что иное, как энергию, поглощенную предварительным объемом при температуре раствора τ_m, т. е.

$$a = q \cdot \gamma \cdot V_0 \cdot \tau_m. \qquad 262$$

Необходимая же подача жидкости определится из равенства 261, т. е.

$$w_1 = \frac{P_{tm}}{q \cdot \gamma \cdot \tau_m}. \qquad 263$$

В случае $I = Const$ и $M = Const$ подачу жидкости можно выразить, принимая во внимание равенство 254, следующим образом:

$$w_1 = \frac{P_t}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma} = \frac{3I^2(R_1 - R_a) - 3I^2 R_1 \cdot C \cdot t}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma}. \qquad 264$$

Таким образом подача в общем случае зависит от того времени, когда наступает максимум температуры; подбирая ту или иную подачу, можно получить максимум повышения температуры при любом значении времени, протекшего с начала пуска в ход двигателя, варьируя соответственно величину предварительного объема V_0.

Общий же объем жидкости рабочего бака определяется как

$$V_1 = V_o + w_1 \cdot t_1, \qquad 265$$

где t_1 — общее время пуска в ход двигателя.

Очевидно, что общий объем жидкости верхнего бака получается минимальным тогда, когда прямая $\overline{aA}$ касается кривой $A_t = \varphi(t)$ в точке, соответствующей концу пуска в ход ($t = t_1$), предварительный объем жидкости V_o при этом должен быть взят равным

$$V_o = \frac{A_1 - t_1 \cdot tg\, \varphi_1}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma}. \qquad 266$$

Однако значение предварительного объема, полученное по последней формуле, обычно оказывается слишком большим. Это нежелательно по тем причинам, что, во-первых, переменный объем получается слишком малым, во-вторых — вследствие малой подачи может иметь место значительная неравномерность нагрева жидкости и, следовательно, относительно плохое ее использование.

Если повышение температуры в функции времени выражается каким-либо аналитическим выражением, то время, при котором наступает максимум повышения температуры, может быть найдено обычным способом нахождения максимума.

Для случая $I = Const$ и $a = Const$, т. е. когда сопротивление зависимости от времени изменяется по прямой линии, время, при котором наступает максимум повышения температуры, определяется из условия

$$\frac{dt}{dt} = \frac{d\,\dfrac{3I^2(R_1 - R_a)t - \frac{3}{2} I^2 \cdot R_1 \cdot C \cdot t^2}{q \cdot \gamma \cdot (V_o + w_1 t)}}{dt} = 0$$

или

$$\frac{R_1 \cdot C \cdot w_1}{2} t^2 + R_1 \cdot C \cdot V_o \cdot t - V_o (R_1 - R_a) = 0, \qquad 267$$

откуда

$$t_m = -\frac{R_1 \cdot C \cdot V_o + \sqrt{(R_1 \cdot C \cdot V_o)^2 + R_1 \cdot C \cdot w_1 \cdot V_o (R_1 - R_a)^2}}{R_1 \cdot C \cdot w_1}. \qquad 268$$

Вышеприведенные выводы относятся к определению повышения температуры жидкости верхнего рабочего бака в предположении, что вся подаваемая в бак жидкость идет на увеличение общего объема ее и перемещение уровня.

В некоторых случаях, однако, определенные из этих условий размеры рабочего бака могут оказаться чрезмерно большими по отношению к размерам электродов, и тогда возникает вопрос о том, чтобы не

всю подаваемую в рабочий бак жидкость оставлять в нем в течение всего периода пуска в ход, а построить реостат с частично стекающей жидкостью. При такой системе только часть общего количества подаваемой жидкости остается в рабочем баке и идет на перемещение уровня, другая же часть, восприняв на себя некоторое количество энергии, стекает через край перемещающейся заслонки обратно в нижний бак. Этим путем достигается, следовательно, с одной стороны, уменьшение рабочего бака реостата без чрезмерного нагрева жидкости, с другой — более равномерная циркуляция раствора между верхним рабочим баком и нижним охлаждающим.

Если обозначить посредством w_1 приращение объема рабочего бака в единицу времени, а посредством w_2 жидкость, стекающую в единицу времени обратно в нижний бак, то, полагая, что нагрев жидкости одинаков по всему объему, можно написать следующие выражения для энергии, поглощенной реостатом.

Энергия, поглощаемая объемом жидкости рабочего бака за время t с начала пуска в ход, представляется в виде:

$$A_{ot} = \gamma \cdot q\,(V_o + w_1 t)\,\tau_t. \qquad 269$$

Энергия же, отводящаяся стекающей жидкостью, выражается посредством уравнения:

$$A_{ot} = \gamma \cdot q \int_o^t \tau_t\, w_2\, dt, \qquad 270$$

или

$$A_{ot} = A_t - \gamma \cdot q\,(V_o + w_1 t)\,\tau_t, \qquad 271$$

где A_t — вся энергия, поглощаемая реостатом за время t.

Дифференцирование уравнений 270 и 271 дает

$$\frac{dA_t}{dt} = \gamma \cdot q \cdot w_2 \cdot \tau_t;\ \frac{dA_{ot}}{dt} = \frac{dA_t}{dt} - \gamma \cdot q\,(V_o + w_1 \cdot t)\,\frac{d\tau}{dt} - \tau_t \cdot w_1 \cdot q \cdot \gamma,$$

откуда вытекает следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\tau_t}{dt} + \frac{w_1 + w_2}{V_o + w_1 t}\,\tau_t = \frac{P_t}{\gamma \cdot q \cdot (V_o + w_1 \cdot t)}, \qquad 272$$

где $P_t = \frac{dA_t}{dt}$ есть пусковая поглощаемая мощность. Откуда при условии максимума повышения температуры $\left(\frac{d\tau}{dt} = 0 \text{ и } \tau_t = \tau_m\right)$ общая подача жидкости равняется:

$$(w_1 + w_2) = \frac{P_t}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma}.$$

Проинтегрировать уравнение 272 является возможным, если известна зависимость пусковой поглощаемой мощности в реостате от времени $P_t = f(t)$.

В частном случае, когда $I = Const$ и $\alpha = Const$, поглощаемая реостатом мощность в функции времени выражается уравнением:

$$P_t = 3I^2 [R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t],$$

и интегрирование дифференциального уравнения 268 дает следующее выражение для температуры жидкости в зависимости от времени, протекшего с начала пуска в ход:

$$\tau_t = \frac{3I^2(R_1 - R_a - R_1 tC)}{\gamma q (w_1 + w_2)} + \frac{3 \cdot I_2 \cdot R_1 C (V_o + w_1 t)}{\gamma q (w_1 + w_2)(2w_1 + w_2)} -$$

$$- \frac{3I^2 (R_1 - R_a) V_o^{\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \cdot (V_o + w_1 t)^{-\frac{w_1 + w_2}{w_1}}}{\gamma q (w_1 + w_2)} -$$

$$- \frac{3I^2 R_1 C V_o^{\frac{2w_1 + w_2}{w_1}} \cdot (V_o + w_1 t)^{-\frac{w_1 + w_2}{w_1}}}{\gamma \cdot q \cdot (w_1 + w_2)(2w_1 + w_2)} =$$

$$= \frac{3I^2}{\gamma q (w_1 + w_2)} \left\{ R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t + \frac{R_1 C}{2w_1 + w_2} \left[V_o + w_1 t - V_o^{\frac{2w_1 + w_2}{w_1}} (V_o + w_1 t)^{-\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \right] - \right.$$

$$\left. - (R_1 - R_a) V_o^{\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \cdot (V_o + w_1 t)^{-\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \right\}, \qquad 273$$

где C — постоянная из уравнения 253, равная $\frac{T_s}{\eta (1 - \alpha)}$.

Если в последнем уравнении положить w_2 равным нулю, то оно принимает вид:

$$\tau_t = \frac{3I^2 (R_1 - R_a) t - \frac{3}{2} I^2 \cdot R_1 \cdot C \cdot t^2}{\gamma q (V_o + w_1 \cdot t)} \qquad 273'$$

т. е. ранее полученное выражение для температуры нагрева жидкости в случае бака без стекающей жидкости (уравнение 259).

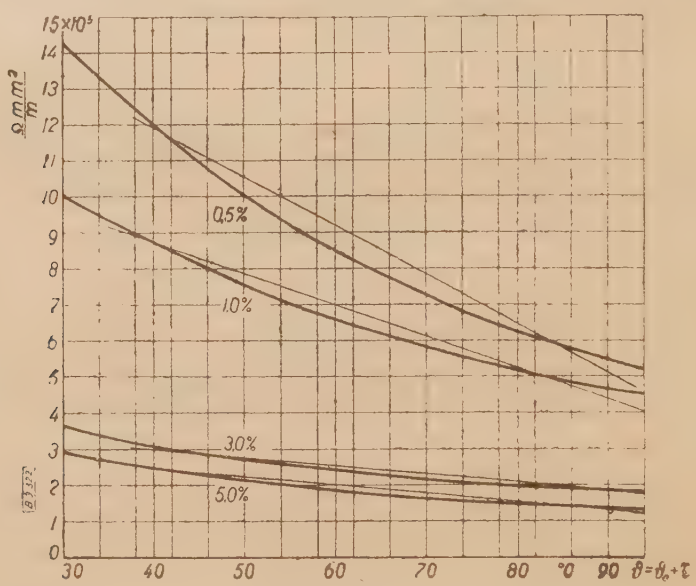
Время, при котором наступает максимум температуры, определяется из условий $\frac{d\tau}{dt} = 0$ (см. ур. 273):

$$t_m = \frac{1}{w_1} \sqrt[\frac{2w_1 + w_2}{w_1}]{\frac{V_o^{\frac{w_1 + w_2}{w_1}} [(R_1 - R_a)(2w_1 + w_2) + R_1 \cdot C \cdot V_o]}{R_1 C}} - \frac{V_o}{w_1}. \qquad 274$$

Это выражение легко приводится к виду уравнения 268, если в нем положить $w_2 = 0$.

Таким образом жидкостный реостат без стекающей жидкости при пуске ($w_2 = 0$) представляет собою частный случай реостата со стекающей жидкостью ($w_2 \neq 0$).

После того как известен закон изменения температуры нагрева жидкости, является возможным проследить изменяемость удельного сопротивления в течение времени пуска в ход двигателя, т. е. $\rho_t = f(t)$. Построение этой зависимости возможно произвести, если известны опытные характеристики раствора, т. е. зависимость его удельного



Фиг. 158.

сопротивления от температуры $\rho = f(\vartheta_0 + \tau)$ для различных концентраций, где ϑ_0 — начальная температура, а τ — повышение температуры раствора (см. фиг. 158). Пользуясь последней зависимостью и зная начальную температуру и изменение повышения температуры раствора по времени, можно построить зависимость удельного сопротивления от времени, т. е. $\rho = f(t)$ (фиг. 158) для любой концентрации раствора.

Необходимость знания изменения удельного сопротивления раствора по времени будет видна из дальнейшего, а именно при определении размеров и формы электродов.

§ 52. Электроды. — Сопротивление жидкости между парой смежных электродов для каждого момента времени может быть представлено, как известно, равенством

$$r_t = m \cdot R_t = \frac{l \cdot \rho_t}{s} \qquad 275$$

где означают:

m — число параллельных ветвей каждой фазы реостата;

l — расстояние между электродами; в реостатах с перемещающимся уровнем жидкости эта величина обычно оставляется постоянной по всей высоте;

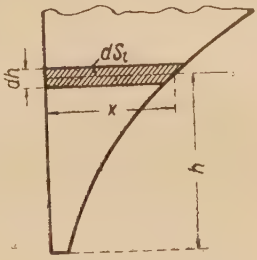
s_t — поверхность электрода, погруженная в жидкость к некоторому моменту времени t;

ρ_t — удельное сопротивление, соответствующее тому же моменту времени t.

Если представить себе элемент электродной поверхности, как указано на фиг. 159, то ширина электрода в данном месте положения уровня жидкости (на высоте средней линии элемента) может быть выражена посредством отношения

$$x_t = \frac{ds_t}{dh}, \qquad 276$$

где ds_t — элемент площади электрода,
а dh — элемент высоты.



Фиг. 159.

Если помножить числителя и знаменателя последнего выражения на элемент времени dt, то оно принимает вид:

$$x = \frac{ds_t}{dh}\frac{dt}{dt} = \frac{ds_t}{dt}\frac{dt}{dh} = \frac{x}{v_t}, \qquad 277$$

где v_t — скорость перемещения уровня жидкости.

Таким образом ширина электрода равняется приращению площади электрода в единицу времени, деленному на скорость перемещения высоты уровня жидкости.

Так как из уравнения 275 площадь электрода для любого момента времени определяется в виде равенства:

$$s_t = \frac{l.\rho_t}{r_t},$$

то первая производная последнего соотношения по времени дает:

$$x = \frac{ds_t}{dt} = l\left(\frac{r\frac{d\rho_t}{dt} - \rho_t\frac{dr_t}{dt}}{r_t^2}\right). \qquad 278$$

Для так называемых **горячих водяных реостатов**, работающих с обыкновенной водой, при постоянной температуре 100°C,

уравнение 276 упрощается вследствие постоянства удельного сопротивления, т. е.

$$x = l\frac{\rho\frac{dr_t}{dt}}{r_t^2}. \qquad 279$$

В том случае, когда сопротивление реостата или удельное сопротивление электролита в функции времени представляет затруднения выразить каким-либо аналитическим выражением, то подсчет величины x можно произвести для различных значений t, пользуясь графически заданными зависимостями $r_t = f(t)$ и $\rho = f(t)$ и построенными тангенциальными функциями $\frac{dr_t}{dt}$ и $\frac{d\rho_t}{dt}$.

В частном случае, когда сопротивление реостата в зависимости от времени изменяется прямолинейно ($I = Const$ и $a = Const$), то

$$R_t = (R_1 - R_a) - R_1 Ct = \frac{l \cdot \rho_t}{s_t m},$$

откуда

$$s_t = \frac{l \cdot \rho_t}{(R_1 - R_a - R_1 Ct)\, m}. \qquad 280$$

Первая производная последнего уравнения по времени дает, следовательно:

$$x_t = \frac{ds_t}{dt} = l\left[\frac{(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t)\frac{d\rho_t}{dt} + R_1 \cdot C \cdot \rho_t}{m(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t)^2}\right], \qquad 281$$

где, как видно, приходится все же иметь дело с графической функцией $\rho_t = f(t)$ и производной от нее $\frac{d\rho_t}{dt} = f(t)$.

Для случая горячих водяных реостатов последнее выражение значительно упрощается вследствие того, что $\rho_t = Const$ и $\frac{d\rho_t}{dt} = 0$, и приобретает следующий вид:

$$x_t = l\frac{R_1 \cdot C \cdot \rho_t}{m(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t)^2}. \qquad 282$$

Если же известна величина $x = \frac{ds_t}{dt}$, то действительная ширина электрода для любого момента времени легко определяется при помощи уравнения 277, т. е.

$$x = \frac{x_t}{v_t},$$

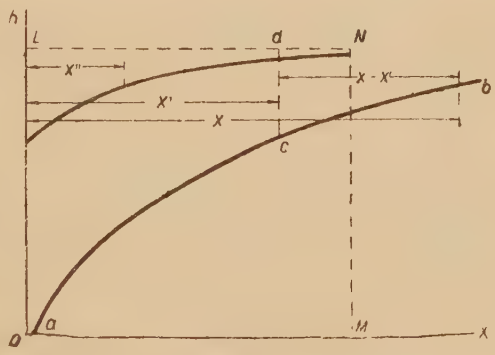
где скорость перемещения уровня жидкости v_t в общем случае есть некоторая функция времени; в случае прямоугольной формы рабочего бака реостата, при условии постоянной подачи жидкости w, скорость изменения высоты уровня жидкости остается постоянной в течение всего времени пуска в ход двигателя; в других случаях закон изменения ее может быть легко определен, если задаться формой рабочего бака реостата.

Объем рабочего бака, найденный ранее из условий нагревания жидкости, например для прямоугольной его формы, может быть выражен посредством его геометрических размеров таким образом:

$$V_1 = a \cdot h_m \cdot x',$$

где размер a в направлении, перпендикулярном плоскостям электродов, определяется числом электродов, расстоянием между ними и расстоянием между крайними электродами и стенками бака; если задаться далее, из конструктивных соображений, максимальной высотой подъема жидкости h_m, то можно подсчитать из последнего равенства размер бака в направлении ширины электрода x'.

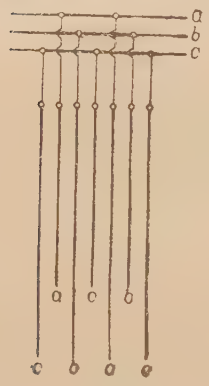
На фиг. 160 прямые NL и MN, проведенные до пересечения между собою, дают боковую поверхность бака $MOLN$. Если теперь на той же диаграмме (фиг. 160) нанести кривую, ограничивающую электрод, т. е. $x = f(h)$, то, как видно, часть электрода выступает за пределы намеченного бака. Может получиться и так, что кривая ab окажется лежащей вся за пределами площади $MOLN$, тогда форму электрода приходится рассчитывать для более высокого значения концентрации раствора; при этом, однако, нужно иметь в виду, что лучше иметь возможно малые концентрации растворов, так как мало концентрированные растворы более устойчивы и надежны в работе.



Фиг. 160.

Если же повышать концентрацию раствора нежелательно (особенно при часто-повторной нагрузке), то приходится в этих случаях прибегать к увеличению размеров бака с соответственным пересчетом изменения температуры электролита по времени, а следовательно, и формы электрода. Однако в случае, когда реостат в конце пуска в ход должен обладать сравнительно малым сопротивлением, размеры

электрода в верхней части его получаются обычно слишком большими, так что часть электрода (фиг. 160) приходится отбрасывать и этим, следовательно, нарушать закон изменения сопротивления; чтобы сохранить этот закон примерно тем же, отброшенную часть электрода можно в той или иной степени скомпенсировать, включая между главными электродами более короткие дополнительные. Ввиду того, что падение напряжения в реостате по мере разбега двигателя при пуске уменьшается, расстояние между главными электродами при введении промежуточных электродов в большинстве случаев является возможным оставить тем же. Длина промежуточного электрода при этом должна быть такой, чтобы падение напряжения между основными и дополнительными электродами, к моменту достижения жидкостью дополнительного электрода, не превосходило предельной величины; в противном случае главные электроды можно несколько раздвинуть, соответственно изменив их размеры.



Фиг. 161.

На фиг. 160 посредством кривой *ab* представлена форма электрода при некоторой концентрации раствора, на которой предполагается остановиться.

Как видно из чертежа, для того, чтобы электрод уместился в очерченный пунктиром объем бака, приходится его урезать по линии *cd* (расстояние *fd* должно быть взятым на обе стороны, из условий минимального допустимого расстояния, см. ниже).

Компенсирующий отброшенную часть дополнительный электрод может быть определен из следующих соображений.

Проводимость электрода *ab* меняется по закону:

$$\lambda = \frac{s_t}{l \cdot \rho_t};$$

эту проводимость можно разложить:

$$\lambda = \frac{s_t}{l \cdot \rho_t} = \frac{s_t'}{l \cdot \rho_t} + \frac{s_t''(n+1)}{\frac{l}{n+1}\rho_t} k = \frac{s_t'}{l \cdot \rho_t} + \frac{s_t''(1+n)^2 k}{l \cdot \rho_t},$$

где n — число промежуточных электродов,

k — коэффициент, учитывающий толщину пластин дополнительных электродов.

Из последнего равенства следует:

$$s_t = s_t' + s_t''(1+n)^2 k. \qquad 283$$

Если взять производную от последнего равенства, то

$$x = x' + x_i''(1+n)^2 k, \qquad 284$$

откуда ширина промежуточного электрода равняется

$$x'' = \frac{x - x'}{k(1+n)^2}, \qquad 284'$$

т. е. ширину промежуточного электрода можно легко определить, если известна форма главного электрода; она есть результат деления отброшенной части ординаты кривой основного электрода $(x - x')$ на переводной коэффициент, учитывающий уменьшение пути прохождения тока и увеличение числа параллельных разветвлений $k(1+n)^2$ (фиг. 160).

Минимальное расстояние между электродами, согласно данным Сименс-Шуккерта, берется из расчета 1 *cm* на 150 *V*. Стенки бака должны отстоять от торцевых частей электродов на расстоянии не меньшем, чем расстояние между основными электродами, а от боковых поверхностей электродов в зависимости от того, применяется ли система с замыкающим электродом или без него. (Системой с замыкающим электродом можно назвать такую, у которой имеется дополнительный крайний электрод *, см. фиг. 161.) В случае открытой системы это расстояние желательно брать не менее 1,5 расстояния между основными электродами. В случае же системы с замыкающим электродом расстояние это может быть значительно уменьшено.

Следует отметить еще, что до последнего времени поверхность электродов рассчитывалась главным образом по максимальной допустимой плотности тока. Однако здесь приходится отметить некоторую неопределенность в этом вопросе. Так, например, допустимые плотности тока, рекомендуемые различными фирмами, колеблются в пределах от 0,05 до 1,0 $\frac{A}{cm^2}$. Последние опыты Wilson'а дают повод думать, что старые данные могут быть в значительной степени повышены, — так, например, для постоянного тока он дает как допустимую плотность тока 5,0 $\frac{A}{cm^2}$, которую можно применять без риска. При переменном же токе 15 $\frac{A}{cm^2}$, согласно его опытам, не оказывают почти никакого влияния на электроды.

* В жидкостных реостатах трехфазного тока с общим верхним рабочим баком, т. е. когда электроды всех трех фаз погружены в общий бак, необходимо для получения равномерной нагрузки отдельных фаз иметь замыкающий электрод и производить соединение электродов треугольником.

Практически, однако, такие плотности тока применять в нормальных типах пусковых реостатов почти не приходится, а потому, следовательно, основным фактором, определяющим размеры и форму электрода, является не плотность тока, а главным образом сопротивление жидкости между электродами.

§ 53. Охлаждение. — По роду отвода тепла жидкостные реостаты с циркулирующей жидкостью разделяются на:

a) горячие водяные, поглощенная энергия которых отводится, главным образом, в виде пара;

b) реостаты с растворами с максимальным допустимым нагревом 80—90° С, поглощенная энергия которых должна отдаваться либо в окружающее пространство через внешнюю поверхность (естественное охлаждение), либо протекающей по охладительным трубам воде (искусственное охлаждение).

Здесь предполагается рассмотреть второй случай, именно реостаты с растворами.

Естественное охлаждение пусковых жидкостных реостатов, вследствие большой постоянной времени нагрева, является возможным применять лишь в установках, требующих сравнительно редкого пуска в ход. Процесс охлаждения протекает, как известно, по экспоненциальной кривой, выражаемой уравнением:

$$\tau_t = \tau_m \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \qquad 285$$

где τ_m — начальное повышение температуры,

T — постоянная времени нагрева, равная

$$T = \frac{q \cdot G}{o \cdot S}, \qquad 286$$

где q — удельная теплоемкость,

G — вес охлаждаемой жидкости,

o — коэффициент теплоотдачи,

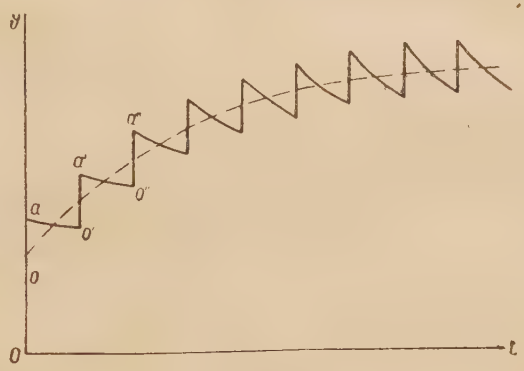
S — поверхность охлаждения.

За расчетную поверхность охлаждения S следует брать ту, с которой соприкасается охлаждающаяся жидкость; однако дно принимать во внимание не следует, так как реостаты обычно устанавливаются на фундамент, и эта часть поверхности не является активно участвующей в процессе охлаждения.

Коэффициент теплоотдачи при передаче тепла от воды через железо в окружающую воздушную среду по данным Сименс-Шуккерта равняется

$$\frac{0{,}01\, kW}{m^2\, {}^\circ C}.$$

При периодическом пуске в ход двигателя или при перемене вращения его, как например в шахтных подъемниках или же в прокатных станах, естественное охлаждение пусковых жидкостных реостатов является недостаточным, и в этих случаях обычно приходится прибегать к искусственному охлаждению жидкости.

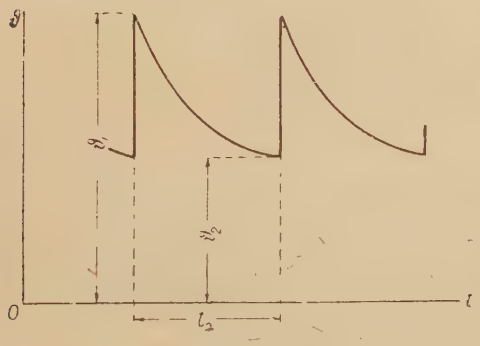


Фиг. 162*a*.

Колебание температуры жидкости в нижнем охлаждающем баке реостата при периодическом пуске в ход двигателя представлено графически на фиг. 162*a*. Очевидно, что общий подъем температуры жидкости должен протекать по экспоненциальному закону, приближаясь, таким образом, к некоторому установившемуся значению.

Части кривой oa, $o'a'$, $o''a''$ и т. д. представляют собою те приращения температуры жидкости нижнего бака, которые она получает за счет сливания нагретой жидкости верхнего бака.

Поверхность охлаждения и количество охлаждающей жидкости должны быть таким образом подобраны, чтобы максимум температуры при установившемся режиме не превосходил предельного допустимого значения.



Фиг. 162*b*.

Если обозначить максимальную температуру нагрева посредством ϑ_1, температуру в конце периода охлаждения — ϑ_2 и время периода охлаждения — t_2 (фиг. 162), то из уравнения охлаждения является возможным определить постоянную времени нагрева, т. е.

$$T = \frac{t_2}{\ln \tau_1 - \ln \tau_2},$$

где τ_1 и τ_2 — превышение температуры раствора нижнего бака в начале и в конце периода охлаждения над средней температурой охлаждающей воды.

С другой стороны — эта постоянная выражается уравнением 281, откуда следует:

$$\frac{t_2}{\ln \tau_1 - \ln \tau_2} = \frac{q \cdot \gamma \cdot V_2}{o\, S_r}$$

и

$$S_r = \frac{q \cdot \gamma \cdot V_2 (\ln \tau_1 - \ln \tau_2)}{o \cdot t_2} = \frac{q \cdot \gamma \cdot V_2 \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}}{o \cdot t_2}, \qquad 287$$

где S_r — поверхность охлаждающих труб,

V_2 — объем жидкости в нижнем баке, значение которого берется около 2÷4-кратного значения активного объема V_1.

По данным Сименс-Шукерта значение коэффициента теплоотдачи для железных труб с водяным охлаждением берется равным

$$O = 0{,}5 \frac{kW}{m^2 \cdot {}^\circ C}. \qquad 288$$

Для иллюстрации приложения приведенных выводов ниже приведена схема расчета пускового жидкостного реостата с циркулирующей жидкостью.

§ 54. Схема расчета. — Для расчета пускового реостата к асинхронному двигателю должна быть известна в общем случае его круговая диаграмма.

Как известно, между крутящим моментом D, развиваемым двигателем, скольжением σ, фазовой силой тока ротора I и сопротивлением фазовой цепи ротора R_2 существует следующее соотношение

$$D \cdot \omega_s = \frac{m \cdot I^2 \cdot R}{\sigma}, \qquad 289$$

где ω_s — синхронная угловая скорость, и m — число фаз ротора.

Если обмотка ротора имеет три фазы ($m = 3$) и соединена в звезду, то сопротивление фазовой цепи ротора двигателя, приведенное к эквивалентному треугольнику, равняется:

$$3R_2 = \frac{D \cdot \omega_s \cdot \sigma}{I_2^2}. \qquad 290$$

Начальное пусковое сопротивление фазовой цепи ротора определяется из последнего уравнения, если в нем положить $\sigma = 1$, т. е.

$$R_1 = \frac{D \cdot \omega_s}{3I^2}. \qquad 291$$

Начальное же фазовое сопротивление реостата равно $R_{t0} = R_1 - R_a$, где R_a — сопротивление фазовой обмотки ротора, приведенное к треугольнику.

Дальнейший закон изменения сопротивления реостата по времени определяется по формуле 289, если известна зависимость крутящего момента и скорости вращения двигателя от времени.

В частном случае, когда нагрузочный момент $M = Const$ и пусковая сила тока $I = Const$ $(D = Const)$ фазовое сопротивление реостата в зависимости от времени определяется уравнением:

$$R_t = (R_1 - R_a) - R_1 C \cdot t, \qquad 292$$

где R_a — сопротивление фазы ротора, приведенное к треугольнику.

Если известна зависимость сопротивления реостата от времени и сила тока в фазе реостата, является возможным построить зависимость поглощенной реостатом энергии от времени, т. е.

$$A_t = f(t)$$

для $I = Const$ и $M = Const$.

$$A_t = 3I^2 (R_1 - R_a) t - \frac{3}{2} R_1 \cdot C \cdot I^2 \cdot t^2. \qquad 293$$

Подача жидкости в рабочий бак определяется уравнением

$$w_1 = \frac{\operatorname{tg} \varphi_m}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma} = \frac{P_{tm}}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma}, \qquad 294$$

где τ_m — максимальное повышение температуры и

φ_m — угол наклона касательной, проведенной к кривой $A_t = f(t)$ из точки, лежащей на оси ординат с значением ординаты, т. е.

$$\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{A_{tm} - \gamma \cdot q \cdot \tau_m \cdot V_0}{t_m}. \qquad 295$$

Как показывает выражение 295, подача зависит также и от того времени, когда наступает максимум температуры. Таким образом максимум температуры жидкости можно получить в любой момент времени с начала пуска в ход; величины же подачи w_1 и предварительного объема V_0 определяется соответственно при этом из выражения тангенса угла наклона касательной и ординаты, отсекаемой этой касательной на оси ординат.

Для $I = Const$ и $M = Const$

$$\operatorname{tg} \varphi_m = P_{tm} = \left[(R_1 - R_a) - R_1 \cdot C \cdot t_m \right] 3I^2, \qquad 296$$

время же, при котором наступает максимум температуры, определяется из выражения

$$t_m = \frac{-R_1CV_0 + \sqrt{(R_1CV_0)^2 + 2R_1CV_0w_1(R_1 - R_a)}}{R_1 \cdot C \cdot w_1}. \qquad 297$$

В этом случае можно не прибегать к графическим построениям; величины w_1 и V_0 определяются следующим образом:

Величина w_1 подсчитывается для любого момента времени из соотношения:

$$w_1 = \frac{[(R_1 - R_a) - R_1Ct_m]\,3J^2}{\tau_m \cdot q \cdot \gamma}. \qquad 298$$

Если теперь в уравнение 297, подставить то же значение времени, для которого определена величина w_1, то легко определяется и величина V_0, т. е.

$$V_0 = \frac{R_1 \cdot C \cdot w_1 \cdot t_m^2}{2(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t_m)}. \qquad 299$$

Совершенно аналогичным образом производится определение общей подачи $(w_1 + w_2)$ и предварительного объема V_0 для реостата со стекающей жидкостью, причем сумму $(w_1 + w_2)$ в этом случае приходится раскладывать на составляющие w_1 и w_2 произвольно.

Общий объем рабочего бака реостата определяется по формуле:

$$V_1 = V_0 + w_1 \cdot t_1, \qquad 300$$

где t_1 — есть время пуска в ход двигателя, равное:

$$t_1 = \Theta \int_0^{\omega_n} \frac{d\omega}{D - M} = \Theta \int_0^{\omega_n} \frac{d\omega}{D(1 - \alpha)}, \qquad 301$$

где ω — угловая скорость ротора двигателя,

и Θ — момент инерции движущих масс, приведенный к ротору двигателя. Для случая $I = Const$ и $M = Const$

$$t_l = \frac{\Theta \cdot \omega_n}{(1 - \alpha)D}. \qquad 301'$$

Для того чтобы знать изменение удельного сопротивления жидкости в течение времени пуска в ход двигателя, необходимо иметь зависимость температуры нагрева жидкости в рабочем баке от времени.

У реостата без стекающей жидкости $(w_2 = 0)$ эта зависимость в общем виде выражается уравнением:

$$\tau_t = \frac{A_t}{q \cdot \gamma(V_0 + w_1 \cdot t)},$$

для случая $I = Const$ и $M = Const$

$$\tau_t = \frac{3I^2 \cdot R_1 \cdot t - \frac{3}{2} R_1 \cdot C \cdot t^2}{\gamma q \cdot (V_0 + w_1 \cdot t)}. \qquad 302$$

Для реостата со стекающей жидкостью зависимость повышения температуры от времени при $I = Const$ и $M = Const$ выражается формулой:

$$\tau_t = \frac{3I^2}{10^3 \gamma q (w_1 + w_2)} \left\{ (R_1 - R_a) - R_1 \cdot C \cdot t + \frac{R_1 \cdot C}{2w_1 + w_2} \left[V_0 + w_1 t - \right.\right.$$

$$\left.\left. - V_0^{\frac{2w_1 + w_2}{w_1}} \cdot (V_0 + w_1 t)^{-\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \right] - (R_1 - R_a) V_0^{\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \cdot (V_0 + w_1 t)^{-\frac{w_1 + w_2}{w_1}} \right\} \qquad 303$$

Если же известен закон изменения температуры жидкости в рабочем баке реостата, является возможным получить, пользуясь характеристиками раствора, зависимость удельного сопротивления раствора от времени, протекшего с начала пуска в ход двигателя $\rho_t = f(t)$.

Ширина электрода для любого момента времени определяется по формуле

$$x = \frac{x_t}{v_t}, \qquad 304$$

где v_t — скорость перемещения уровня жидкости в рабочем баке, а x_t — производная от площади электрода по времени; в общем случае она выражается равенством:

$$x_t = l \left(\frac{r_t \frac{d\rho_t}{dt} - \rho_t \frac{dr_t}{dt}}{r_t^2} \right), \qquad 305$$

для горячих водяных реостатов ($\rho_t = \rho_h = Const$)

$$x_{th} = -l \frac{\rho_h \frac{dr_t}{dt}}{r_t^2}, \qquad 305'a$$

в случае же $I = Const$ и $a = Const$ выражения 305 и 305а соответственно принимают вид

$$x_t = \frac{l}{m} \frac{(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t) \frac{d\rho}{dt} + R_1 \cdot C \cdot \rho_t}{(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t)^2} \qquad 306$$

и

$$x_{th} = \frac{l}{m} \frac{R_1 \cdot C \cdot \rho_h}{(R_1 - R_a - R_1 \cdot C \cdot t)^2} \qquad 306'$$

Как видно, в уравнение 306 входит производная от удельного сопротивления по времени, которая может быть получена графическим путем. Однако последний способ слишком кропотлив и неточен.

Подсчет величины x_t можно значительно упростить, если сделать допущение, что удельное сопротивление раствора с температурой изменяется по прямолинейному закону * (см. фиг. 158), т. е.

$$\rho = a - b\tau. \qquad 307$$

В последнем выражении значение τ может быть заменено его зависимостью от времени, тогда

$$\rho_t = a - b\,\frac{3I^2(R_1 - R_a)\,t - \frac{3}{2}\,I^2R_1Ct^2}{q\,\gamma\,(V_0 - w_1t)}. \qquad 307'$$

Если взять производную от последнего выражения и подставить в уравнение 306, то для реостатов без стекающей жидкости оно получит вид:

$$x_t = \frac{l}{m}\left[\frac{R_1\cdot C\cdot a}{(R_0 - R_1Ct)^2} - \frac{3\cdot I^2\cdot b}{\gamma\cdot q\,(V_0 + w_1t)^2}\left(V_0 - \frac{R_1\cdot C\cdot w_1\cdot t^2}{2\,(R_0 - R_1Ct)}\right)\right], \qquad 308$$

где R_0 — сопротивление реостата в начале пуска в ход; где коэффициенты a и b для содового раствора могут быть в зависимости от концентрации взяты из таблицы 28 (при условии, если ρ выражается в $\frac{\Omega\,mm^2}{m}$ и начальная температура раствора равняется 40° C).

Таблица 28

Концентрация в %	$a = \rho_{40^\circ C}$	b
0,1	6 000 000	68 000
0,5	1 200 000	13 000
1,0	880 000	8 300
3,0	300 000	2 000
5,0	250 000	2 000

* Здесь можно было бы подобрать математическое выражение, более полно удовлетворяющее данной зависимости (например показательную функцию), однако это слишком усложнило бы выражение x_t, не давая, таким образом, преимуществ при расчете.

Предварительная площадь электрода, соответствующая начальному пусковому сопротивлению реостата, определяется из формулы 275 при условии $t = 0$, т. е.

$$s_0 = \frac{l \cdot \rho_0}{R_1 - R_a}. \qquad 309$$

В том случае, когда начальная температура электролита равна 40° С, $\rho_0 = a$ (см. таблицу 28).

Промежуточные электроды, если в таковых является необходимость, рассчитываются по формуле:

$$x'' = \frac{x - x'}{k(1+n)^2}. \qquad 310$$

Поверхность охлаждающих труб при искусственном охлаждении определяется по формуле:

$$S_r = \frac{q \cdot \gamma \cdot V_2 \cdot \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}}{o \cdot t_2}. \qquad 311$$

Количество же охлаждающей жидкости, протекающей по трубам в единицу времени, равняется:

$$w_k = \frac{A_1}{q \cdot \gamma \cdot t_2 \cdot \tau_w} = \frac{a}{q \cdot \gamma \cdot \tau_w}, \qquad 312$$

где A_1 — энергия, поглощенная реостатом в течение пуска в ход двигателя, и τ_w — повышение температуры охлаждающей воды.

Пример расчета. — Требуется рассчитать жидкостный реостат с перемещающейся жидкостью для пуска в ход асинхронного двигателя.

Данные двигателя:

Номинальная мощность $P_n = 1\,500$ *kW*.

Скорость вращения $n = 960$ *об/мин*.

Первичное напряжение $E_1 = 3\,000$ *V*.

Вторичное напряжение на кольцах при разомкнутом роторе

$$E_2 \cong 1\,000 \ V.$$

Сопротивление фазовой обмотки ротора $R_a = 0{,}0253\ \Omega$.

Обмотки статора и ротора соединены в звезду.

Коэффициент полезного действия $\eta = 0{,}96$.

Коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0{,}9$.

Условия пуска:

Двигатель пускается с номинальным постоянным нагрузочным моментом ($M = Const$).

Момент, развиваемый при пуске, равен полуторному нагрузочному моменту ($a = 0{,}67$; $D = 1{,}5\ M$.)

Маховой момент вращающихся масс, приведенный к валу ротора, $GD^2 = 14\,300\ kgm^2$.

Частота пуска $f_h = 10$.

Номинальный нагрузочный момент на валу двигателя равняется:

$$M = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{1500 \cdot 1000 \cdot 30}{\pi \cdot 960} \cong 15\,000\ J = 1\,530\ mkg.$$

Пусковой момент $D = 1{,}5\ M = 1{,}5 \cdot 1\,530 = 2\,300\ mkg$.

Ускоряющий момент $D - M = 2\,300 - 1\,530 = 770\ mkg$.

Момент инерции вращающихся масс равен:

$$\Theta = \frac{GD^2}{4g} = \frac{14\,300}{4 \cdot 9{,}81} = 359\ kgm\ sec^2.$$

Время разбега двигателя на основании формулы 301 равно:

$$t_1 = \frac{\Theta \cdot \omega_n}{D - M} = \frac{359 \cdot \pi \cdot 960}{30 \cdot 770} = 46{,}5\ sec.$$

Сила тока ротора, соответствующая пусковому моменту (на основании круговой диаграммы), равна:

$$I_2 = 1\,395 A.$$

Фазовая сила тока реостата

$$I_{2r} = \frac{1\,395}{\sqrt{3}} = 810 A.$$

Начальное пусковое сопротивление фазовой цепи ротора, приведенное к эквивалентному треугольнику,

$$R_1 = \frac{D \cdot \omega_s}{I_2^2} = \frac{2\,300 \cdot 9{,}81\,\pi \cdot 1\,000}{30 \cdot 1\,395^2} = 1{,}22\ \Omega.$$

Сопротивление фазовой обмотки ротора, приведенное к треугольнику $R_a = 3.0{,}0253 = 0{,}076\ \Omega$.

Начальное сопротивление реостата $R_0 = 1{,}22 - 0{,}076 = 1{,}144\ \Omega$.

Пусть температура достигает своего максимума по истечении 30 *sec* с начала пуска, т. е. $t_m = 30$ *sec*.

Постоянная C определяется из выражения 254 при условии

$$R_t' = R_a = 0{,}076\ \Omega,$$

т. е.

$$C = \frac{R_1 - R_a}{R_1 t_1} = \frac{1{,}144}{1{,}22 \cdot 46{,}5} \cong 0{,}02 \ sec^{-1},$$

и тогда (см. формулу 296) $P_{tm} = 3 \cdot 810^2 \cdot 10^{-3} (1{,}144 - 1{,}22 \cdot 0{,}02 \cdot 30) = 815 \ kW$.

Если взять максимальное повышение температуры $\tau_m = 50° \ C$, то подача жидкости в рабочий бак реостата равняется:

$$w_1 = \frac{P_{tm}}{q \cdot \gamma \cdot \tau_m} = \frac{815}{4{,}2 \cdot 50} = 3{,}9 \ l/sec,$$

и предварительный объем (ур. 299),

$$V_0 = \frac{1{,}22 \cdot 0{,}02 \cdot 3{,}9 \cdot 30^2}{2\,(1{,}144 - 1{,}22 \cdot 0{,}02 \cdot 30)} = 104 \ l.$$

Общий объем рабочего бака тогда определяется следующим образом:

$$V_1 = V_0 + w_1 \cdot t = 104 + 3{,}9 . 46{,}5 = 285 \ l.$$

Изменение повышения температуры раствора в зависимости от времени выражается уравнением 302:

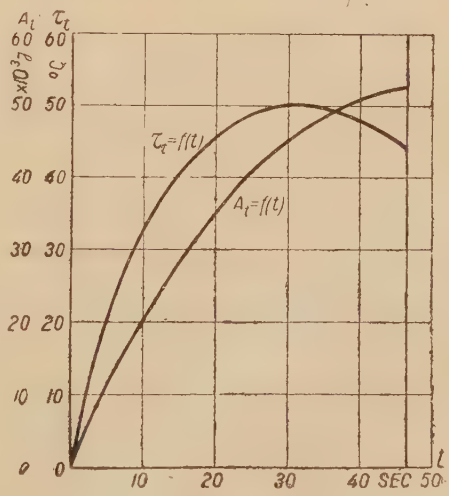
$$\tau_t = \frac{A_t}{q \cdot \gamma \cdot (V_0 + w_1 \cdot t)} = \frac{3 \cdot 810^2 \cdot 1{,}144 t - \frac{3}{2} 810^2 \cdot 1{,}22 \cdot 0{,}02 t^2}{4{,}2 \cdot 10^3 (104 + 3{,}9 t)} = \frac{535\,t - 5{,}7\,t^2}{104 + 3{,}9\,t}.$$

На фиг. 163 представлены графически зависимости $A_t = f(t)$ и $\tau_t = f(t)$. Как видно, температура раствора достигает своего максимума через 30 *sec.* с начала пуска.

Если расстояние между электродами и расстояние между крайним электродом и стенкой бака взять равным 10 *cm*, то размер рабочего бака в направлении, перпендикулярном плоскостям электродов, будет:

$$a = 3 \cdot 10 + 2 \cdot 10 = 50 \ cm.$$

Максимальное падение напряжения на 1 *cm* раствора при этом составляет:



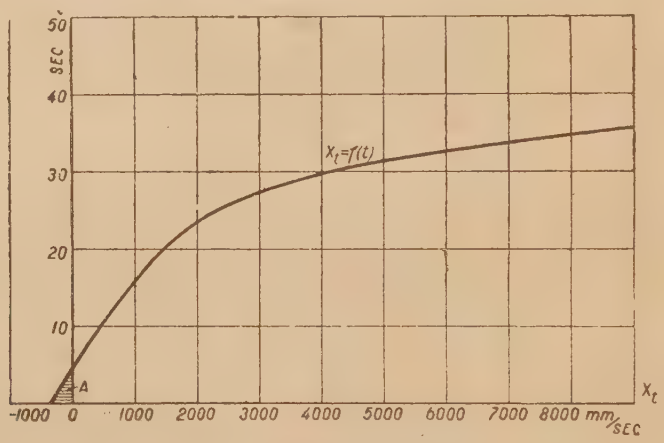
Фиг. 163.

$$\frac{1\,000}{10} = 100 \ \frac{V}{cm}.$$

Форма электрода рассчитывается по формуле 308. Для раствора с трехпроцентной концентрацией с начальной температурой 40° C эта формула для $m = 1$ приобретает вид

$$x_t = 0{,}1\left[\frac{1{,}22 \cdot 0{,}02 \cdot 310^5}{(1{,}144 - 1{,}22 \cdot 0{,}02\,t)^2} - \frac{3 \cdot 810^2 \cdot 2 \cdot 10^3}{4\,200\,(104 + 3{,}9\,t)^2}\left(104 - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \frac{1{,}22 \cdot 0{,}02 \cdot 3{,}9\,t^2}{2\,(1{,}144 - 1{,}22 \cdot 0{,}02\,t)}\right)\right]\frac{mm^2}{sec}.$$

На фиг. 164 представлена графически зависимость $x_t = f(t)$, вычисленная по приведенной формуле.



Фиг. 164.

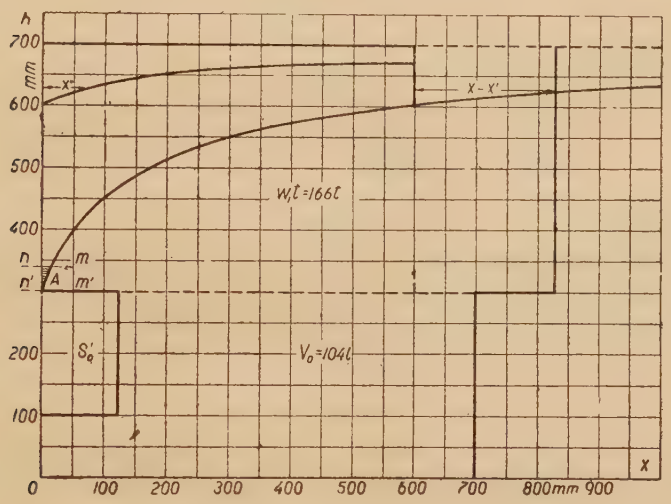
Как видно из фиг. 164, величина x_t в начале пуска вследствие резкого падения удельного сопротивления получает отрицательное значение. Это следует понимать таким образом, что в начале пуска должно иметь место отрицательное приращение (уменьшение) площади электрода за счет предварительной ступени, т. е. площадь A должна входить в счет площади предварительной ступени и в течение четырех секунд выводиться, после чего начинается приращение площади, которая, приблизительно, после 8 секунд достигает опять значения предварительной ступени. Действительный процесс здесь можно представить так, как это изображено на фиг. 165. Уровень жидкости должен сначала находиться в положени $n - m$, и площадь A входит в счет предварительной ступени; с начала пуска уровень опускается до положения $n' - m'$, уменьшая тем самым площадь предварительной ступени, и после чего уже поднимается до конца пуска.

Однако не будет большой ошибки, если площадь предварительной ступени взять с самого начала уменьшенной на величину A и по

истечении четырех секунд начать перемещение заслонки, а, следовательно, и уровня жидкости, оставляя при этом подачу жидкости в рабочий бак с момента включения реостата постоянной.

Уменьшение общего объема рабочего бака при этом произойдет на величину $3{,}9 \cdot 4 = 15{,}6\,l$ и

$$V_1 = 285 - 15{,}6 = 270\,l.$$



Фиг. 165.

Если рабочий бак взять прямоугольной формы и активную высоту его 400 *mm*, то тогда скорость перемещения уровня жидкости равняется:

$$v = \frac{400}{46{,}5 - 4} = 9{,}4\ \frac{mm}{sec}.$$

Действительная форма электрода в зависимости от высоты уровня жидкости, представленная на фиг. 165, определяется по формуле 304.

Площадь A составляет (из диаграммы фиг. 164) 770 mm^2.

Площадь предварительной ступени определяется по формуле 309:

$$s_0 = \frac{0{,}1 \cdot 3 \cdot 10^5}{1{,}22 - 0{,}076} = 26\,200\ mm^2$$

и уменьшенная на величину A: $s_0' = 26\,200 - 770 = 25\,430\ mm^2$.

Активный объем рабочего бака составляет:

$$270 - 104 = 166\,l.$$

Размер рабочего бака в направлении плоскостей электродов:

$$x' = \frac{166}{5 \cdot 4} = 8{,}3\ dm = 830\ mm.$$

Максимальную ширину электрода можно взять равной 600 *mm*, при этом расстояние электродов от лобовых стенок составит 115 *mm* с каждой стороны (фиг. 165).

На фиг. 165 показаны окончательные размеры рабочего бака реостата, а также основного и дополнительного электрода, который определяется на основания соотношения 310:

$$x'' = \frac{x - x'}{1{,}025\,(1 + 1)^2} = \frac{x - x'}{1{,}025\ 4}$$

(при толщине пластин равной 5 *mm*).

Поверхность охлаждающих труб нижнего бака реостата вычисляется по формуле 311.

Величины, входящие в эту формулу следующие:

Объем жидкости нижнего бака:

$$V_2 = (2 \div 3)\ V_1 \cong 550\ l.$$

Если считать среднюю температуру охлаждающих труб 20°*C*, то превышение температуры жидкости в нижнем баке по отношению к трубам в конце периода охлаждения равняется:

$$\tau_2 = 40 - 20 = 20°\ C.$$

Повышение температуры жидкости нижнего бака при смещении с верхним объемом равно:

$$\Delta\tau = \frac{\tau\ V_1}{V_2} = \frac{44 \cdot 270}{550} = 21{,}6°\ C,$$

где $\tau = 44°\ C$ — повышение температуры в верхнем рабочем баке к концу периода пуска (см. фиг. 163).

Превышение температуры жидкости нижнего бака по отношению к охлаждающим трубам после слияния объемов равняется:

$$\tau_1 = (40 + 21{,}6) - 20 = 41{,}6°C.$$

Период охлаждения:

$$t_2 = \frac{3\,600}{f_k} = \frac{3\,600}{10} = 360\ sec,$$

тогда

$$S_r = \frac{4{,}2 \cdot 550 \lg \frac{41{,}6}{20}}{0{,}5 \cdot 360} = 9{,}1 \ m^2.$$

Количество охлаждающей воды при условии начальной (входящей) температуры ее 15° C и конечной (выходящей) — 25° C приблизительно равно (форм. 312):

$$w_k = \frac{52\,500}{4{,}2 \cdot 360\,(25 - 15)} = 3{,}47 \ \frac{l}{sec}.$$

Таким образом при условии равномерного нагрева жидкости в рабочем баке расчет пускового жидкостного реостата с перемещающимся уровнем жидкости, как показывают вышеприведенные выкладки, может быть более или менее уложен в математические рамки.

Что же касается жидкостных реостатов с подвижными электродами и неподвижным уровнем жидкости, то здесь вопрос с расчетом обстоит много сложнее вследствие значительной разницы температур нагрева, а, следовательно, и непостоянства удельного сопротивления раствора в различных его слоях. Этот вопрос мог бы послужить специальной темой экспериментального исследования с целью разработки расчета такого рода реостатов.

*

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

РЕГУЛЯТОРЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ

*

По своему назначению регуляторы силы тока возбуждения разделяются на:

a) регуляторы для поддержания постоянства напряжения,

b) регуляторы для изменения напряжения при постоянной силе тока,

c) регуляторы для изменения напряжения при различных силах тока,

d) регуляторы для изменения скорости вращения двигателей.

Первые регуляторы применяются в электрических машинах с посторонним возбуждением и самовозбуждением. Второй вид регуляторов находит применение в зарядных и вольто-добавочных машинах. Регуляторы третьего вида служат главным образом в тех случаях, когда необходимо осуществить регулировку силы тока при постоянном сопротивлении цепи.

Скоростные регуляторы применяются в шунтовых и сериесных двигателях.

Регуляторы для поддержания постоянства напряжения должны быть так рассчитаны, чтобы они при неизменном или повышенном на 10 % числе оборотов и холодном состоянии обмоток электромагнитов могли поддерживать напряжение постоянным в пределах от полной нагрузки до холостого хода.

Регуляторы возбуждения для генераторов с посторонним возбуждением мощностью в 100 *kW* или 100 *kVA* и более должны позволять при тех же условиях понижать временно напряжение на 50 %.

За нормальные допустимые отклонения от номинального напряжения при регулировке принимаются величины, указанные в таблице 29.

Нормальными пределами регулировки скорости вращения посредством шунтовых регуляторов в двигателях, служащих для привода с постоянным крутящим моментом, считаются + 15 %, + 50 %, + 100 % и + 200 %. Если внешний крутящий момент возрастает с увеличением числа оборотов, то пределом регулировки скорости (повышения числа оборотов) является + 15 %.

Таблица 29

Допустимые пределы регулировки напряжения

Назначение регуляторов	Мощность генератора	
	До 100 kW	Свыше 100 kW
Для шунтовых генераторов постоянного тока	± 2 %	± 1 %
Для генераторов переменного тока с регулировкой возбуждения:		
при самовозбуждении возбудителя	± 3 %	± 2 %
при постороннем возбуждении возбудителя	± 2 %	± 1 %
Для генераторов переменного тока	± 2 %	± 1 %

Если регуляторы напряжения для генераторов выполняются так, что с помощью их можно размыкать цепь возбуждения, то при напряжении возбуждения, равном или выше 50 V, они должны снабжаться особыми устройствами, которые позволяют размыкать цепь возбуждения без вреда для обмоток возбуждения регулируемой машины или самого регулятора (например путем короткого замыкания обмотки возбуждения перед включениями).

Скоростные регуляторы для шунтовых двигателей постоянного тока должны быть такой конструкции, чтобы их нельзя было выключить.

Все регулирующие реостаты как правило рассчитываются на продолжительную нагрузку. Если реостат предназначен для кратковременной нагрузки, то об этом должно быть соответствующее указание, причем такие реостаты не могут применяться в качестве регулирующих реостатов.

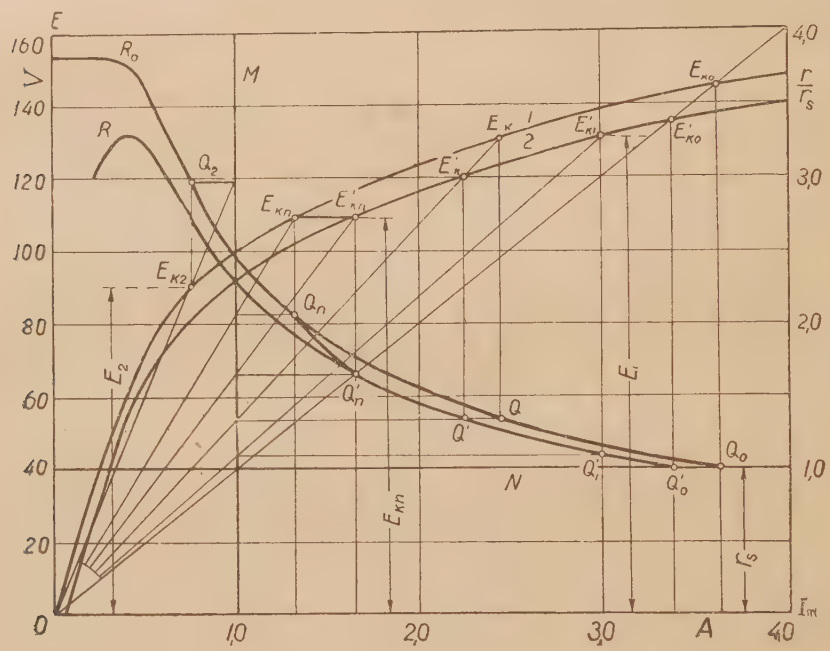
Расчет регуляторов возбуждения может производиться графическим и аналитическим способами; первый способ является более простым по сравнению со вторым, но он менее точен, нежели другой.

§ 55. Графический метод определения сопротивлений ступеней регулятора самовозбуждающихся машин.—Графический расчет регулировочного сопротивления является наиболее легким и употребительным, но посредством него определение сопротивления ступеней производится недостаточно точно. Ниже приводится графический метод расчета регуляторов возбуждения, предложенный Хунке (Hunke).

Для применения графического метода необходимо иметь характеристичные кривые генератора. Пусть необходимо рассчитать регулировочное сопротивление для генератора при работе его вхолостую. Для этого строят его характеристику холостого хода, т. е. зависимость

электродвижущей силы от силы тока возбуждения. Такая характеристика представлена на фиг. 166 в виде кривой 1.

Под углом α, тангенс которого численно равен в соответствующем масштабе сопротивлению обмотки возбуждения генератора в нагретом состоянии, из начала координат O проводится луч $\overline{OE_{k0}}$. Точка E_{k0} определяет собою напряжения и ток возбуждения, которые соответствуют случаю приключения обмотки возбуждения к зажимам генератора без добавочного сопротивления.



Фиг. 166.

Далее проводится линия M, параллельная оси ординат, имеющая абсциссу равную в некотором масштабе 1 амперу (или 10 амперам, вообще равную некоторому целому числу ампер, удобнее кратному 10).

Тогда ордината точки пересечения этого перпендикуляра с лучом $\overline{OE_{k0}}$ дает, как это легко видеть, в масштабе вольт непосредственно сопротивление обмотки возбуждения в омах (или путем деления на 10, или на другой переводной множитель, выбранный выше). Через полученную таким образом точку пересечения проводят горизонталь N. На правой оси ординат наносится масштаб сопротивлений, при этом сопротивление обмотки возбуждения принимается за единицу.

После этого построения легко получить кривую сопротивлений цепи возбуждения.

С этой целью под любым углом, соответствующим другому сопротивлению R_1, проводится луч $\overline{OE_k}$. Из точки пересечения этого луча с перпендикуляром M проводится горизонталь. Точка Q, полученная от пересечения этой горизонтали с перпендикуляром, опущенным из точки E_k, должна принадлежать кривой сопротивления, т. е. ордината точки Q в масштабе $\frac{r}{r_s}$ дает сопротивление для точки E_k, т. е. сопротивление цепи возбуждения, при котором на зажимах машины, при холостом ходе, устанавливается напряжение, равное в масштабе вольт, ординате точки E_k. Добавочное же сопротивление R на диаграмме фиг. 166 представляется отрезком ординаты, заключенным между кривой сопротивления и параллелью к оси абсцисс N.

Таким образом по указанному способу можно построить всю кривую сопротивлений R_o, соответствующую регулировке возбуждения для холостого хода генератора.

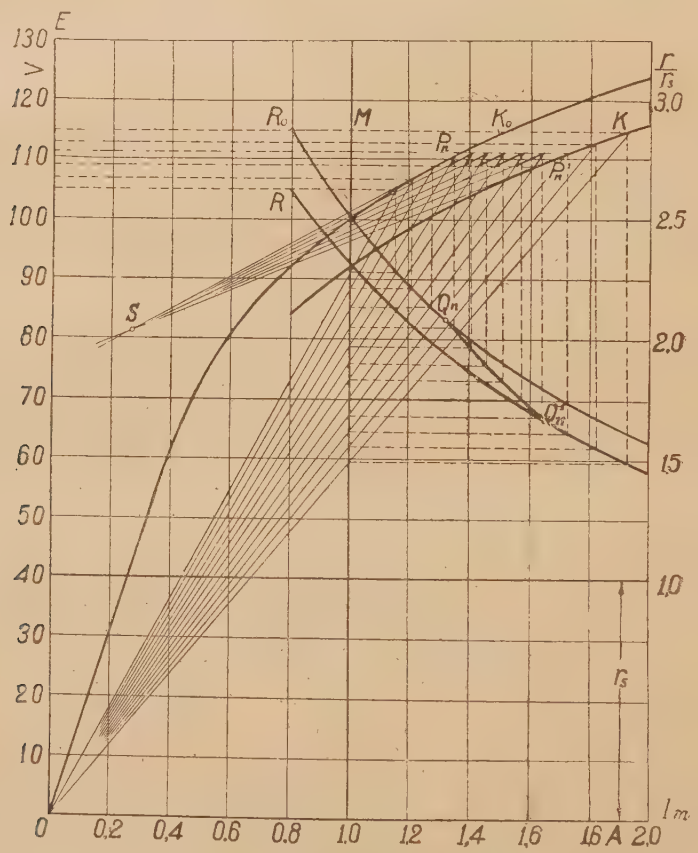
При нагрузке машины, вследствие известных причин, напряжение на зажимах меньше, чем при холостом ходе; и кривая, выражающая зависимость $E_k = f(I_m)$, для данной постоянной силы тока якоря, так называемая „нагрузочная характеристика", изображена на диаграмме фиг. 166 в виде кривой 2; для этой кривой можно построить, пользуясь тем же методом, что и для характеристики холостого хода, кривую сопротивлений R. Ход построений ясен из чертежа фиг. 166.

Построенные кривые $R_0 = f(I_m)$ и $R = \varphi(I_m)$ позволяют решить следующую задачу: как надо регулировать силу тока возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки от нуля до заданного предела напряжение на зажимах генератора оставалось неизменным и равным, например, $E_{ko} = 110\ V$.

Если для $E_{ko} = 110\ V$ на кривой холостого хода соответствует точка E_{kn} (см. кривую 1 на диаграмме фиг. 166), а на кривой нагрузочной характеристики — точка E'_{kn} (кривая 2), то сопротивления цепи возбуждения, соответствующие этим условиям, могут быть представлены на диаграмме фиг. 166 тангенсами углов, образуемых с осью абсцисс лучами $\overline{OE_{kn}}$ и $\overline{OE'_{kn}}$. Эти же сопротивления могут быть найдены по кривым R_o и R, если из точек E_{kn} и E'_{kn} провести линии, параллельные оси ординат. Параллели, проведенные из точек E_{kn} и E'_{kn} до соответствующих кривых R_0 и R, дают две точки Q_n и Q'_n, между которыми находится кривая $Q_n\ Q'_n$, согласно которой должно изменяться сопротивление цепи возбуждения для поддержания постоянства напряжения на зажимах генератора при переходе от режима холостого хода к заданной нагрузке. Эта кривая может быть построена тем же методом, что и кривые R_0 и R, причем она должна

строиться, по отношению к прямой $E_{kn} E'_{kn}$ так же, как кривая R_0 по отношению *1* (фиг. 166).

Если теперь необходимо, например, чтобы при данной нагрузке напряжение на зажимах возросло до $E_1 = 130\ V$, которому соответствует на кривой *1* точка E_1, то сопротивление для этого случая определяется точкой Q'_1 на кривой R.



Фиг. 167.

Иногда может возникнуть вопрос о необходимости уменьшения напряжения при холостом ходе на некоторую определенную величину.

Пусть, например, необходимо уменьшить напряжение холостого хода до значения $E_2 = 90\ V$. Этому напряжению соответствует на кривой 1 точка E_{k2}. На кривой сопротивлений R_0 точке E_{k2} соответствует точка Q_2, ордината которой и дает значение сопротивления, необходимого для получения этого результата.

Следует еще раз отметить, что ход изменения напряжения зависит от изменения величины регулировочного сопротивления: при

изменении сопротивления по кривой R напряжение на зажимах, при постоянном токе нагрузки, протекает по кривой 2; при изменении сопротивления по кривой Q_n Q'_n напряжение на зажимах изменяется по прямой E_{kn} E'_{kn}, т. е. остается неизменным при изменении силы тока нагрузки в известных пределах.

Обычно регуляторы возбуждения выполняются в виде ступенчатых реостатов, посредством которых изменение силы осуществляется не плавно, а скачками; поэтому при применении ступенчатого регулятора возбуждения можно поддерживать напряжение более или менее постоянным лишь в известных пределах.

При расчетах ступенчатого регулятора задаются допустимыми изменениями напряжения вверх и вниз от номинального значения напряжения и, пользуясь приемами, приведенными ниже при изложении примера расчета, определяют число ступеней и сопротивление каждой из них.

Пусть требуется рассчитать регулятор возбуждения для шунтового генератора, характеристики которого (холостого хода и нагрузочная) представлены на фиг. 167, причем $E_{kn} = 110\ V$; допустимые колебания напряжения, при переключении с одной ступени на другую, $2\ V$, т. е. $E_{kmax} = 111\ V$ и $E_{kmin} = 109\ V$.

Если точку P_n, лежащую на характеристике холостого хода и соответствующую значению $E_{kmax} = 111\ V$, соединить прямой с началом координат, то эта прямая определяет не только сопротивление цепи возбуждения, но также и напряжение на зажимах и ток возбуждения, так как при данном неизменном сопротивлении цепи шунта эта прямая является внешней характеристикой.

По заданному условию падение напряжения ниже $109\ V$ допускать нельзя. При увеличении нагрузки уменьшение напряжения происходит по прямой $\overline{PO}$, и в момент достижения напряжением предельного значения $109\ V$ необходимо выключить одну ступень реостата, отчего увеличивается ток возбуждения, а следовательно повышается и напряжение на зажимах генератора. Это повышение происходит по закону $E_k = f(I_m)$, т. е. по кривой нагрузочной характеристики, и достигает значения $111\ V$.

Для того, чтобы это повышение не перешло границ в $111\ V$, необходимо иметь в цепи обмотки возбуждения сопротивление, которое определяется в надлежащем масштабе тангенсом угла наклона прямой, проведенной из начала координат до пересечения с нагрузочной характеристикой в точке, соответствующей напряжению на зажимах $111\ V$.

Таким образом для нахождения ступеней реостата необходимо построить части кривых нагрузочных характеристик, в пределах для данного примера между $109\ V$ и $111\ V$, как это показано на фиг. 167.

С достаточной для практики точностью можно считать, что части кривой нагрузочных характеристик в небольших пределах мало отличаются от прямых, и тогда ход построения значительно упрощается.

С целью дальнейшего упрощения построения можно сделать еще допущение, что лучи, проведенные через прямолинейные отрезки нагрузочных характеристик, пересекаются в одной точке S (фиг. 167).

Поэтому нахождение этих отрезков производится таким образом: проводят касательные к точкам P_n и P'_n и точкой S пересечения их пользуются как началом прямых, отрезки коих заменяют собою дуги нагрузочных характеристик.

В дальнейшем построение ведется следующим образом: точка P_n соединяется с началом координат O. Из точки S, через точку, являющуюся местом пересечения прямой $\overline{P_nO}$ с параллелью к оси абсцисс, соответствующей нижнему пределу напряжения $E_{kmin} = 109\ V$, проводится луч до пересечения с параллелью к оси абсцисс, выражающей верхний предел напряжения $E_{kmax} = 111\ V$.

Из полученной точки проводится луч в начало координат O.

Далее построение повторяется, т. е. из точки S проводится луч через точку, полученную от пересечения луча с параллелью оси абсцисс, соответствующей $E_{kmin} = 109\ V$.

Точку пересечения, полученную при продолжении луча до параллели к оси абсцисс, соответствующей $E_{kmax} = 111\ V$, соединяют с началом координат O, получая таким образом новую точку, пользуясь которой продолжают построение далее.

Полученная зигзагообразная линия дает закон изменения напряжения на зажимах генератора от режима холостого хода до полной нагрузки, при переключении ступеней регулирующего реостата.

Кривая $Q_n\ Q'_n$ строится обычным путем, причем построение ее ведется для среднего напряжения $E_{kn} = 110\ V$.

Во избежание загромождения чертежа излишними линиями при построении кривой $Q_n\ Q'_n$ удобно пользоваться лучами, исходящими из точки O.

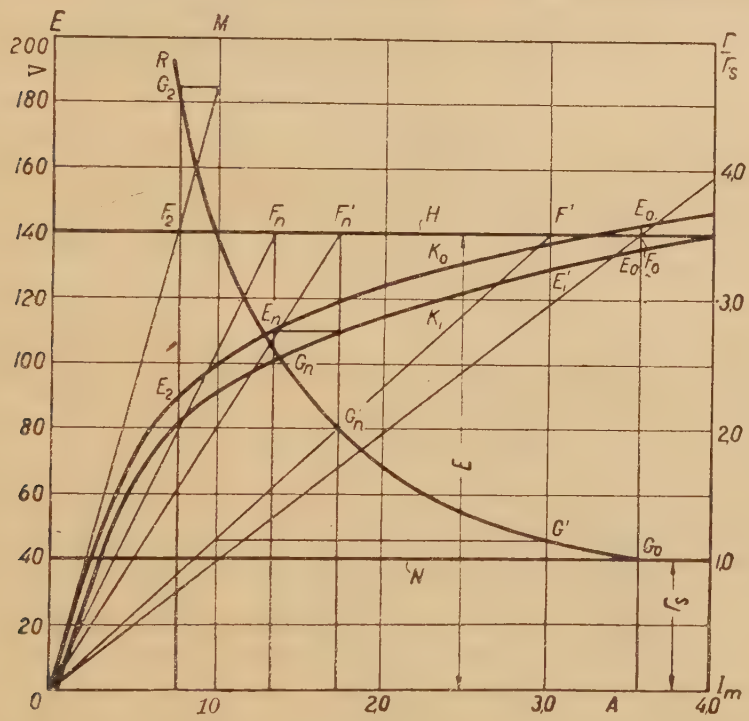
При таком построении упрощается нахождение сопротивления отдельных ступеней, так как они определяются, как проекции на ось ординат отрезков кривой $Q_n\ Q'_n$, заключенных между двумя прямыми линиями, проведенными из точек пересечения лучей с параллелью оси абсцисс, соответствующей $E_{kn} = 110\ V$.

§ 56. Расчет ступеней регулятора для независимого возбуждения машин. — В случае независимого возбуждения какой-либо электрической машины напряжение источника тока для цепи возбуждения может быть постоянным или изменяющимся. Однако ха-

рактер изменения напряжения у возбудителя не влияет на ход расчета реостата для регулировки возбуждения, поэтому в дальнейшем приводится метод расчета для случая, когда возбудитель имеет на своих зажимах постоянное напряжение.

Если при постороннем возбуждении какой-либо электрической машины напряжение возбудителя поддерживается постоянным, то графически это постоянство напряжения выражается в координатах (E, I_m), прямой H, параллельной оси абсцисс (см. фиг. 168).

Через точку E_n, лежащую на кривой характеристики холостого хода и соответствующую номинальному напряжению генератора, прово-



Фиг. 168.

дится прямая, параллельная оси ординат, до пересечения с кривой характеристики напряжения возбудителя, в данном случае с прямой H.

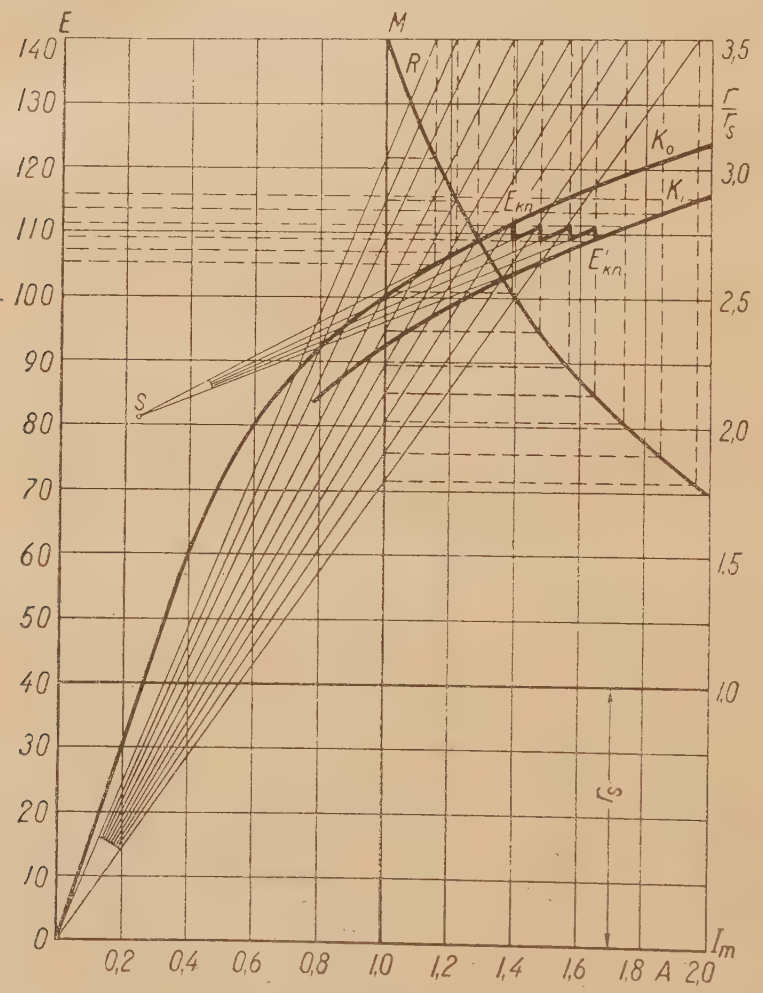
Через полученную точку пересечения F_n проводится луч из начала координат O.

Так же, как и раньше, в точке, соответствующей силе тока возбуждения в $1A$ (или $10A$ и т. д.), проводится прямая M.

Из точки пересечения этой прямой M с лучом $\overline{OF_n}$ проводится параллель к оси абсцисс до пересечения с перпендикуляром, опущенным на ось абсцисс из точки F_n.

Таким путем определяется одна точка G_n кривой регулировочного сопротивления.

Производя построение кривой сопротивления для характеристики холостого хода K_0 (см. фиг. 169) генератора, а также и для его нагрузоч-



Фиг. 169.

ной характеристики K, легко заметить одну особенность, резко отличающую построение кривой сопротивлений для машины с независимым возбуждением от таковой же для машины с самовозбуждением: кривая сопротивлений R является общей как для кривой K_0, так и для кривой K, т. е. она зависит только от кривой напряжения возбудителя H. Так же, как и раньше, общее сопротивление регулятора для любой

точки кривой напряжения генератора дается отрезком, заключающимся между соответствующей точкой кривой сопротивления R и параллелью к оси абсцисс N, построение которой производится так же, как и в предыдущем случае.

В случае необходимости поддерживать напряжение генератора постоянным, например, равным $E_{kn} = E_{kn}'$, область регулировки определяется на кривой сопротивлений R пределами G_n и G_n'.

Определение ступеней сопротивления показано на фиг. 169, где область регулирования вынесена в увеличенном масштабе.

Как и в предыдущем случае, здесь отрезки кривых нагрузочных характеристик заменяются отрезками прямых; точка S пересечений двух касательных находится тем же способом и является центром пучка лучей. Дальнейшее построение несколько мало отличается от построений для машины с самовозбуждением.

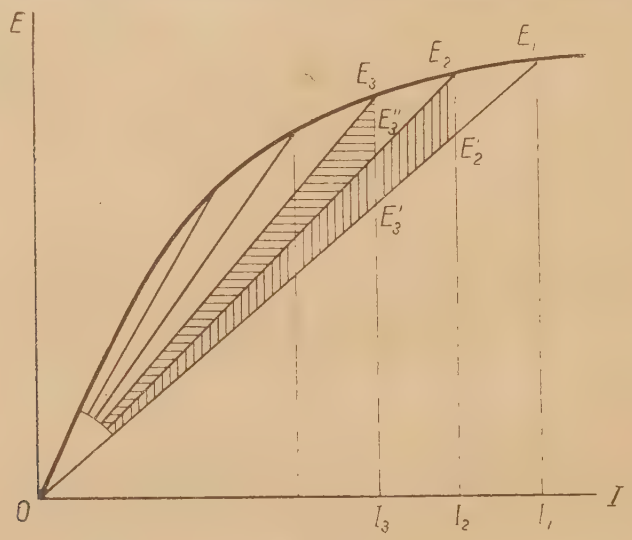
Для примера колебания напряжения генератора даны опять в пределах $109 \div 111$ V. Если при напряжении, соответствующем $E_{k0} = 111$ V, начать нагружать генератор, то напряжение на зажимах его понижается. Но так как все построения для данного примера произведены в предположении, что напряжение возбудителя постоянно, то и ток возбуждения останется постоянным. В соответствии с этим понижение напряжения на зажимах генератора изобразится прямой, перпендикулярной к оси абсцисс. При достижении нижнего предела 109 V, необходимо одну ступень реостата выключить. При выключении ступеней ток возбуждения увеличивается, при этом возрастает напряжение на зажимах генератора, причем само изменение напряжения происходит по кривой нагрузочной характеристики, соответствующей данному току нагрузки, или, приближенно, по отрезку прямой, полученному от пересечения пограничных линий с лучом, проведенным из точки S через точку минимального допустимого напряжения, равного в рассматриваемом примере 109 V.

Это возрастание напряжения происходит до заданного предела в 111 V, затем при дальнейшей нагрузке оно опять падает, и в результате построения получается, как в предыдущем случае, зигзагообразная линия, которая и представляет закон изменения напряжения на зажимах генератора между холостым ходом и полной нагрузкой.

Для определения величины сопротивления ступеней необходимо соответствующие точки кривой K_0 спроектировать, как это указано на чертеже фиг. 169, на кривую сопротивлений. На фиг. 169 эти построения сделаны также и для повышения напряжения для заданной нагрузки.

§ 57. Объемная мощность регуляторов для машин самовозбуждающихся и с независимым возбуждением.—Выше были даны графические

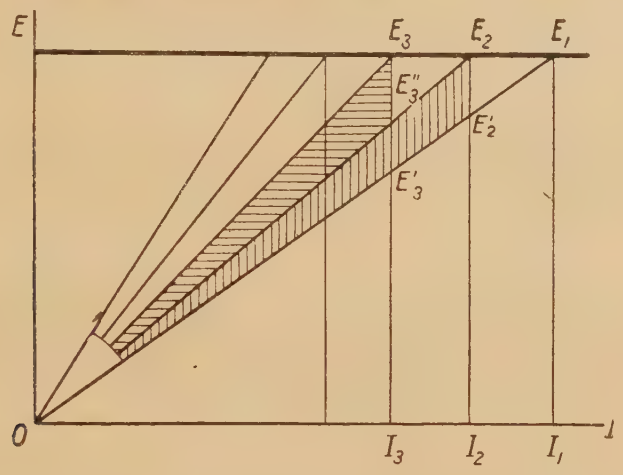
методы расчета числа и величины сопротивлений отдельных ступеней регуляторов возбуждения. Зная, кроме того, максимальные значения протекающего через каждую ступень тока, можно, как это было описано ранее, определить поперечное сечение проводников и на основании всех полученных данных подсчитать количество материала, необходимое для изготовления реостата. Часто, однако, случается, что необходимо бывает знать количество материала, не прибегая к вышеупомянутым предварительным точным подсчетам. Количество материала, идущего на изготовление элементов сопротивления реостата, зависит главным образом от тепловой мощности, которую может поглощать рео-



Фиг. 170.

стат при прохождении по нему тока при условии, чтобы нагрев реостата при продолжительной нагрузке его не превышал некоторого определенного значения. При этом необходимо заметить, что упомянутая здесь тепловая мощность не является результатом прохождения по всем ступеням реостата тока одинаковой силы, а представляет собою сумму всех тепловых мощностей, поглощаемых в каждой отдельной ступени при прохождении по ним тока максимальной соответствующей для каждой из них силы. Тепловая мощность каждой ступени достигает максимального значения тогда, когда подвижной контакт реостата стоит как раз на данной ступени. Это положение удобнее всего доказывается графически при помощи диаграммы, изображенной на фиг. 170, на которой нанесена кривая характеристики холостого хода генератора с самовозбуждением, т. е. зависимость напряжения на зажимах генератора от силы тока воз-

буждения при постоянной скорости вращения. Пусть точка E_1 соответствует тому напряжению, которое устанавливается на зажимах генератора при выведенном реостате возбуждения, а точки E_2, E_3 и т. д. — напряжениям при включении одной, двух и т. д. ступеней реостата. Как известно, площадь треугольника OE_1I_1 пропорциональна мощности, поглощаемой обмотками возбуждения при силе тока возбуждения I_1. При включении первой ступени реостата сила тока возбуждения понижается до значения I_2, и мощность, поглощаемая в обмотках возбуждения, выражается в этом случае площадью треугольника $OE_2'I_2$; мощность же, поглощаемая первой ступенью реостата, может быть в том же масштабе выражена площадью треугольника



Фиг. 171.

OE_2E_2'. Нетрудно увидеть, что мощность, поглощаемая первой ступенью реостата, достигает в данном случае максимального значения, так как при включении второй ступени реостата она выражается уже площадью треугольника $OE_3'E_3''$, который является частью треугольника OE_2E_2'. При включении следующих ступеней реостата мощность эта все время продолжает понижаться. То же самое можно сказать и относительно мощности, поглощаемой во второй ступени реостата, максимальное значение которой равно площади треугольника OE_3E_3'' и наступает как раз в момент включения этой ступени. Аналогичным образом можно доказать это положение для любой ступени реостата. Настоящее положение справедливо также и для того случая, когда напряжение возбуждения поддерживается постоянным, как это имеет место, например, в машинах с посторонним возбуждением. Этот случай изображен на фиг. 171, и доказательство остается тем же, как и для предыдущего случая.

Пусть, например, I_ν представляет собою максимальное значение силы тока, на которую рассчитана ν-я ступень реостата, и R_ν — сопротивление этой ступени, тогда количество материала определяется значением тепловой мощности, поглощающейся в этой ступени $I_\nu^2 R_\nu$. Найдя соответствующие значения для всех остальных ступеней реостата и просуммировав их, получают некоторую тепловую мощность, значение которой определяет необходимое для изготовления реостата количество материала; эта тепловая мощность называется объемной мощностью реостата и обозначается буквой P. Однако подобный способ вычисления значения P, как уже упоминалось ранее, слишком затруднителен, так как требует предварительного расчета сопротивлений отдельных ступеней реостата. Для более простого подсчета значения P предполагают, что число ступеней реостата бесконечно велико, т. е. имеет место плавная регулировка, тогда объемная мощность реостата может быть определена из уравнения:

$$P = \int_{r_0}^{r_1} I^2 \cdot dr. \qquad 313$$

После интегрирования по частям получают:

$$P = I_1^2 \cdot r_1 - I_0^2 \cdot r_0 - 2\int_{I_0}^{I_1} r \cdot I \cdot dI,$$

где I_0 — максимальное значение силы тока возбуждения, а r_0 — соответствующее сопротивление цепи возбуждения, точно так же I_1 и r_1 представляют собою те же величины, но для другого предела регулировки; r_0 может представлять собою сопротивление только одной обмотки возбуждения или то же сопротивление плюс постоянное добавочное сопротивление. Если обозначить посредством $E = I \cdot r$ напряжение возбуждения, а значения его, которые должны быть при максимальном и минимальном токе возбуждения, — при помощи E_0 и E_1, то

$$P = 2\int_{I_1}^{I_0} E\,dI - E_0 \cdot I_0 + E_1 \cdot I_1. \qquad 314$$

Чтобы понизить силу тока возбуждения до нуля, сопротивление реостата должно иметь некоторое определенное значение. Так как напряжение возбуждения имеет всегда конечное значение, то сопротивление для этого случая должно быть бесконечно велико, но значение объем-

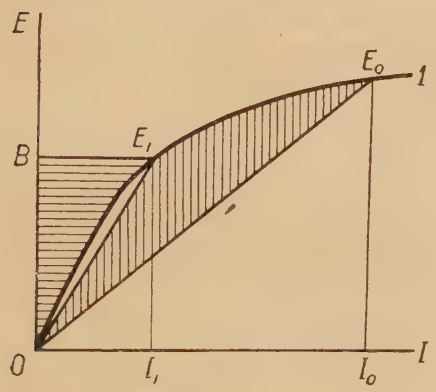
ной мощности реостата P остается, однако, конечным. Если это предельное значение обозначить посредством P, то при $I_1 = 0$ из уравнения 314 получают:

$$P_0 = 2\left[\int_0^{I_0} E \cdot dI - \frac{1}{2} E_0 \cdot I_0\right]. \qquad 315$$

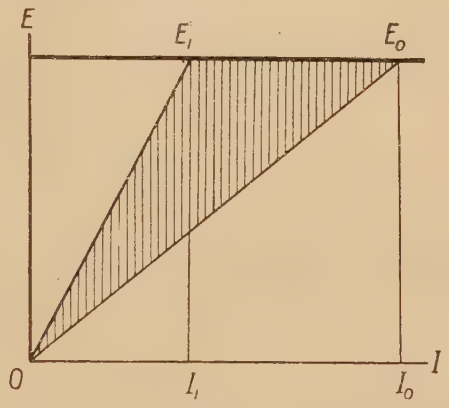
Соответствующее выражение получается для тепловой мощности P_{01} в том случае, если сила тока возбуждения понижается с I_1 до нуля. При этом окончательно объемная мощность реостата равна:

$$P = P_0 - P_{01}. \qquad 316$$

Из рассмотрения выражения, стоящего в квадратных скобках уравнения 315, можно сделать следующие выводы. Как было сказано,



Фиг. 172.



Фиг. 173.

E есть напряжение возбуждения, которое при генераторах с самовозбуждением определяется по кривой характеристики холостого хода машины, изображенной на фиг. 172 в виде кривой *1*. На той же диаграмме нанесены два луча $\overline{OE_0}$ и $\overline{OE_1}$, соединяющие начало координат с точками, соответствующими наивысшему и наинизшему напряжению возбуждения, которые получаются при регулировке. Из рассмотрения фиг. 172 и 173 ясно, что интеграл, стоящий в квадратных скобках, выражает площадь, ограниченную осью абсцисс, кривой *1* и ординатой точки E_0, а второй член этих скобок определяет собой площадь треугольника OI_0E_0. Таким образом P_0 может быть в окончательном виде выражено двойной площадью, ограниченной лучом $\overline{OE_0}$ и кривой *1*. Аналогично значение P_{01} может быть выражено двойной площадью, ограниченной лучом $\overline{OE_1}$ и частью кривой *1*. На основании всего только что сказанного можно сделать следующий вывод: если нанести

в прямоугольных координатах кривую зависимости напряжения возбуждения от силы тока возбуждения и из начала координат провести два луча, пересекающие эту кривую в точках, соответствующих высшему и низшему пределам регулировки, то величина реостата может быть выражена двойной площадью, ограниченной этими двумя лучами и частью кривой.

На фиг. 172 эта площадь заштрихована вертикально. Если для этих подсчетов воспользоваться кривой нагрузочной характеристики *2* на фиг. 166, то необходимо иметь в виду, что ниже точки, в которой луч, проведенный из начала координат, касается кривой, устойчивое состояние напряжения невозможно. Поэтому интегрирование следует начинать с той точки, которой на фиг. 166 соответствует максимум кривой R.

Если обратиться теперь к случаю постороннего возбуждения с постоянным напряжением возбуждения, как это имело место на фиг. 168 и 169, то в уравнении 314 необходимо подставить $E = E_0 = E_1$, и после интегрирования получают:

$$P = E_1 (I_0 - I_1). \qquad 317$$

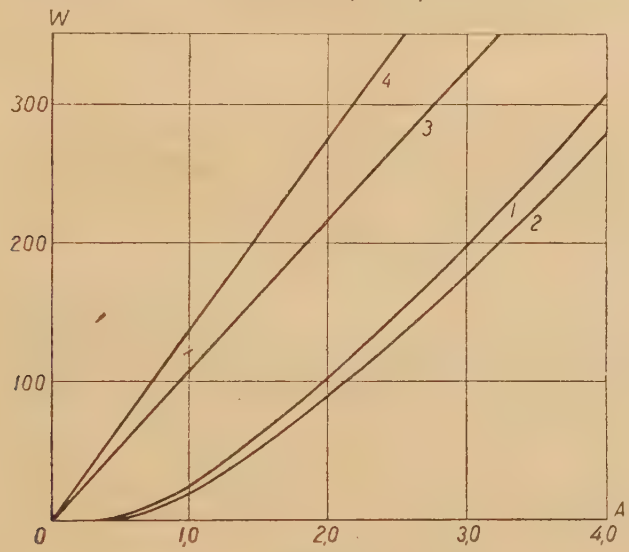
Графически этот случай изображен на фиг. 173, где объемная мощность реостата выражается двойной площадью треугольника OE_1E_0, построенного так же, как в предыдущем случае. Нетрудно доказать, что площадь треугольника OE_1E_0 равна половине площади прямоугольника $E_1I_1I_0E_0$ (равные основания и высоты), так что объемную мощность реостата можно определить без построения треугольника. Это же непосредственно вытекает из уравнения 317.

На фиг. 174 нанесены кривые *1* и *2*, представляющие зависимость значений P_0 от силы тока возбуждения I и подсчитанные на основании кривых характеристики холостого хода и нагрузочной, приведенных на фиг. 166. Кроме того здесь нанесены еще две прямые *3* и *4*, представляющие $P_0 = f(I)$ для постоянного напряжения возбуждения в 110 V и в 140 V. С помощью этих кривых легко непосредственно определить объемную мощность реостата как разность ординат точек кривой, соответствующих выбранным предельным значениям I.

В качестве примера пользования вышеупомянутыми кривыми ниже найдены значения P для случаев, разобранных ранее.

При изменении напряжения на зажимах машины при нагрузке от $E_k = 110$ V до $E_k' = 130$ V, по кривой 2 фиг. 166 легко найти соответствующие пределы регулировки $I_0 = 3A$ и $I_1 = 1{,}67A$, которым на кривой 2 фиг. 174 соответствуют значения P_0, равные 181 W и 66 W, так что объемная мощность реостата для этого случая равна $P = 181 - 66 = 115$ W. Для поддержания постоянного напряжения $E_k = 110$ V на зажимах при переходе от режима холостого хода до

полной нагрузки пределы регулировки, как это видно из чертежа фиг. 167, равны $I_0 = 1{,}67\ A$ и $I_1 = 1{,}32\ A$; поэтому, пользуясь прямой *3* фиг. 174, находят $P'' = 184 - 145 = 39\ W$. Если далее понижение напряжения на зажимах производится при холостом ходе машины от $E_k = 110\ V$ до напряжения, соответствующего току возбуждения в $0{,}77\ A$, то объемная мощность реостата определяется по кривой *1* фиг. 174 по значениям $I_0 = 1{,}32\ A$ и $I_1 = 0{,}77\ A$, и оказывается равной $P''' = 48 - 12 = 36\ W$. Таким образом объемная мощность реостата для регулировки силы тока возбуждения в пределах от $3{,}0\ A$ до $0{,}77\ A$ и изменения напряжения по вышеприведенному закону составляет $P = P' + P'' + P''' = 115 + 39 + 36 = 190\ W$.



Фиг. 174.

Если подсчитать объемную мощность реостата для тех же пределов регулировки, но для постороннего возбуждения при напряжении возбудителя, равном $140\ V$, то для этого случая $P = 420 - 107 = 313\ W$ (см. кривые фиг. 174).

Из фиг. 166 и 168 следует, что наименьшее напряжение, при котором возможно получить ток возбуждения силою в $3\ A$, равно $120\ V$, откуда следует, что наименьшая объемная мощность реостата при постороннем возбуждении получается равной $P = 120(3{,}0 - 0{,}77) = 268\ W$; эта мощность выше на $40\,\%$, чем при самовозбуждении.

§ 58. Потери в регуляторах возбуждения. — Одной из важнейших величин, характеризующих реостаты возбуждения, являются возникающие в них тепловые потери. Мощность этих последних составляет:

$$P = I^2 \cdot (r - r_0) = E \cdot I - I^2 \cdot r_0. \qquad 318$$

и, как легко видеть, потери исчезают при $r = r_0$, так как тогда через реостат не протекает никакого тока; точно так же P может быть весьма малой при очень больших значениях r, так как сила тока при этом очень мала, а напряжение возбуждения $E = I \cdot r$ не возрастает выше некоторого предела. Отсюда следует, что, при некотором промежуточном значении r, потери получают максимальное значение. Главное значение для расчета реостатов имеет именно это максимальное значение, так как от него зависят нагрев сопротивлений и коэффициент полезного действия машины. Чтобы определить значение r, соответствующее максимальным потерям, дифференцируют уравнение 318 и приравнивают первую производную нулю, причем за независимое переменное принимают I:

$$\frac{dP}{dI} = E + I\frac{dE}{dI} - 2r_0 \cdot I = 0. \qquad 319$$

Ранее приводилось выражение для относительного магнитного насыщения (см. стр. 202):

$$\mu_\rho = 1 - \frac{I}{\Phi} \cdot \frac{d\Phi}{dI},$$

где Φ — магнитный поток якоря. Если в этом выражении заменить Φ и $d\Phi$ пропорциональными им величинами E и dE, то после сокращения на коэффициент пропорциональности получается

$$\mu_\rho = 1 - \frac{I}{E} \cdot \frac{dE}{dI}, \qquad 320$$

откуда находят:

$$I\frac{dE}{dI} = E - \mu_\rho E = E(1 - \mu_\rho).$$

После подстановки полученного значения $I\frac{dE}{dI}$ в уравнение 319, последнее принимает вид:

$$E + I\frac{dE}{dI} - 2r_0 \cdot I = E + (1 - \mu_\rho)E - 2r_0 \cdot I = 0.$$

или

$$(1 - \mu_\rho)E = 2r_0 \cdot I - E. \qquad 321$$

Полученное уравнение 321 дает возможность определить силу тока возбуждения I, при которой потери достигают своего максимального значения P_{max}. Графическое определение этого значения I производится на основании следующих соображений.

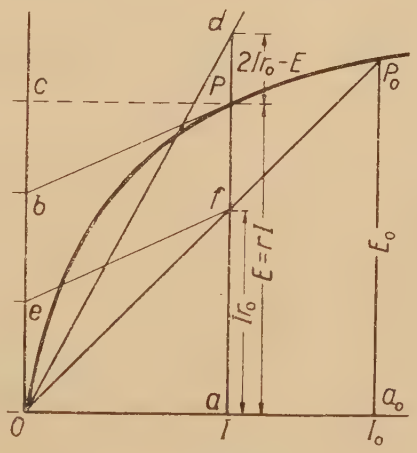
Касательная, проведенная к кривой характеристики холостого хода (фиг. 175) в точке P с координатами (E, I), отсекает, как это легко

видно, на оси ординат отрезок $\overline{Ob} = \mu_\rho E$. Если через точку P провести горизонталь до пересечения ее с осью ординат в точке c, то отрезок $\overline{cb}$ в масштабе напряжения дает $E - \mu_\rho E = E(1 - \mu_\rho)$. Далее проводят из начала координат луч под углом, соответствующим удвоенному сопротивлению $(2r_0)$ обмотки возбуждения, включая сюда и добавочное сопротивление, до пересечения в точке d, с вертикалью, проведенной через точку P. Если точка P соответствует максимальным потерям, то согласно уравнению 321 $\overline{Pd} = \overline{cb}$. Луч $\overline{OP_0}$, проведенный под углом, соответствующим сопротивлению обмотки возбуждения, пересекает ординату точки P в точке f, а прямая, проведенная из точки f параллельно линии $\overline{Pb}$, пересекает ось ординат в точке Из уравнения 321 следует, что

$$\frac{\mu}{2} E = E - r_0 I = I(r - r_0), \qquad 321\text{ а}$$

откуда получается, что $\overline{eb} = \frac{1}{2}\overline{Ob}$, так как отрезок $\overline{cb} = \frac{\mu_\rho}{2} E$.

Таким образом для нахождения значения силы тока возбуждения, соответствующего максимальным тепловым потерям реостата, построение ведется следующим образом: из начала координат проводят луч $\overline{OP_0}$, через точку, соответствующую напряжению машины при выведенном реостате; далее в произвольной точке P проводят касательную к кривой до пересечения ее с осью ординат в точке b, а также опускают из точки P перпендикуляр $\overline{P_a}$ на ось абсцисс; из точки f пересечения этого перпендикуляра с лучом $\overline{OP_0}$ проводят линию, параллельную прямой $\overline{Pb}$, до пересечения ее с осью ординат в точке e.



Фиг. 175.

Если при этом оказывается, что $\overline{Oe} \neq eb$, то построение необходимо повторить для какой-нибудь другой точки P_1. Обычно после нескольких построений удается получить желаемый результат.

Для машин с посторонним возбуждением, у которых напряжение возбудителя постоянно, $\mu_\rho = 1$, так как

$$\mu_\rho = 1 - \frac{I}{E} \cdot \frac{dE}{dI} = 1 - 0 = 1$$

уравнение 321 принимает вид:

$$E = 2r_0 \cdot I. \qquad 322$$

Кроме того, так как

$$\frac{\mu_\rho}{2} E = Ir \frac{\mu_\rho}{2} = I(r - r_0)$$

и

$$r \frac{\mu_\rho}{2} = r - r_0,$$

то

$$\frac{r}{r_0} = \frac{2}{2 - \mu_\rho}.$$

На чертеже фиг. 175 это выразится тем, что точка f будет делить отрезок $\overline{P}_a$ в отношении

$$\frac{E}{r_0 I} = \frac{rI}{r_0 I} = \frac{r}{r_0} = \frac{2}{2 - \mu_\rho}.$$

На основании этого получается, что для $\mu_\rho = 1$ $r = 2r_0$.

Так как при

$$\mu_\rho = 1 \ (1 - \mu_\rho) E = 0,$$

то точки b и c на фиг. 175 совпадают, точно так же, как и точки d и P, а точка f лежит на середине отрезка $\overline{aP}$.

Для этого случая значение максимальных потерь определяется очень просто. При постоянном напряжении возбуждения E максимальные тепловые потери в регулирующем реостате составляют:

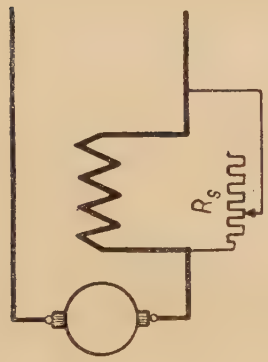
$$P_{max} = E \cdot I - I^2 r_0 = E \cdot \frac{E}{2r_0} - \frac{E^2}{4r_0^2} \cdot r_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{E^2}{r_0}. \qquad 323$$

§ 59. Регуляторы для заданного тока возбуждения. — *a*: Определение числа ступеней. — В сериесных машинах постоянного тока, как известно, обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря, так что ток якоря является в то же время током возбуждения. Понижение напряжения в этом случае достигается путем последовательного включения сопротивления в цепь якоря. Такая регулировка, однако, весьма невыгодна вследствие получающихся при этом в регуляторе поля больших джоулевых потерь.

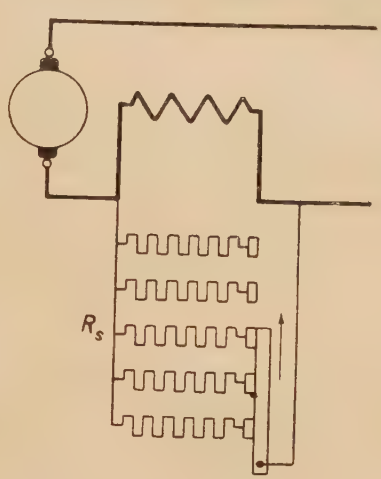
Более экономичным является включение регулирующего сопротивления параллельно цепи возбуждения по схемам, указанным на чертежах фиг. 176 и 177.

По схеме фиг. 176 понижение напряжения на зажимах генератора достигается путем уменьшения величины регулирующего сопротив-

ления R_s, и уменьшения тем самым силы тока возбуждения, по схеме же фиг. 177, то же самое достигается путем увеличения числа включенных параллельных ветвей регулирующего реостата. Для расчета



Фиг. 176.

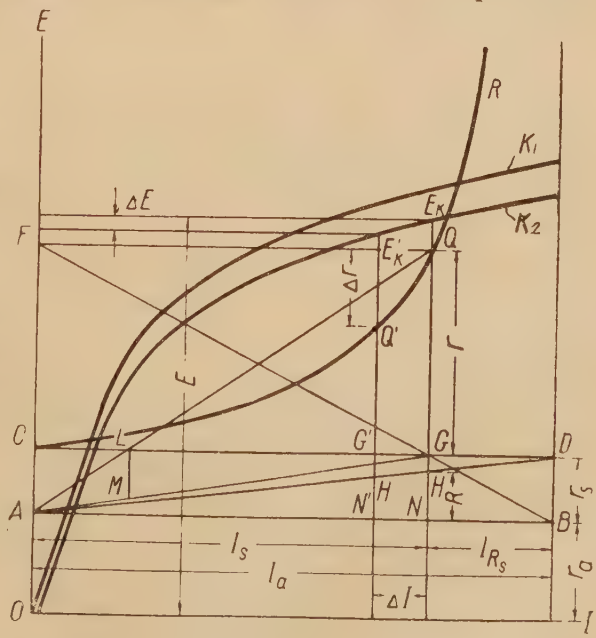


Фиг. 177.

ступеней регулирующего сопротивления необходимо иметь характеристику холостого хода машины, т. е. кривую зависимости $E_{k0} = f(I)$.

На этой же диаграмме по оси ординат откладывают в соответствующем масштабе сопротивление якоря r_a, включая сюда сопротивление компенсационной обмотки и дополнительных полюсов, и сопротивление обмотки возбуждения r_s, так что общее сопротивление $r_a + r_s$ определяется параллелью оси абсцисс $\overline{CD}$ (фиг. 178a).

Номинальный ток якоря I_a на диаграмме фиг. 178a изображен абсциссой AB. На фиг. 178a сопротивление регулятора поля принято таким, что распределение токов в обмотке возбуждения и в регулирующем



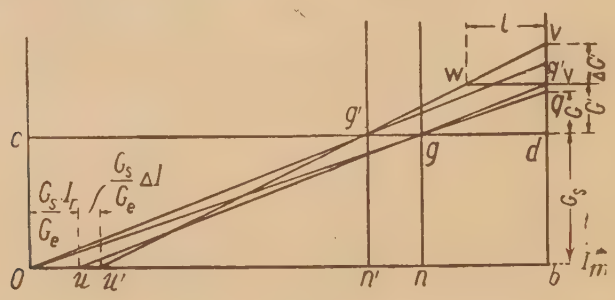
Фиг. 178a.

сопротивлении выражается отрезками $\overline{AN} = I_s = \overline{CG}$ и $\overline{NB} = I_{R_s} = \overline{GD}$, где I_s — ток возбуждения, а I_{R_s} — ток в сопротивлении R_s.

Через точки B и G проводят прямую до пересечения с осью ординат в точке F.

Если из этой точки F провести горизонталь до пересечения с перпендикуляром к оси абсцисс NG, то точка их пересечения Q дает отрезок GQ, определяющий в выбранном масштабе сопротивление регулирующего реостата R_s для принятого распределения токов I_s и I_{R_s}.

В этом можно легко убедиться при рассмотрении фиг. 178:



Фиг. 178*b*.

Из треугольников FGQ и GNB следует пропорция:

$$\frac{\overline{FC}}{\overline{GN}} = \frac{\overline{CG}}{\overline{NB}},$$

откуда

$$\overline{FC} = \overline{GQ} = \frac{\overline{GN} \cdot \overline{CG}}{\overline{NB}} = \frac{r_s \cdot I_s}{I_{R_s}},$$

т. е.

$$\overline{GQ} = r,$$

где r — сопротивление участка цепи, по которому протекает ток I_{R_s}, т. е. сопротивление регулятора поля R_s.

Если провести прямую $\overline{AD}$, то она отсекает на перпендикуляре $\overline{NG}$ отрезок $\overline{NH}$, численно равный общему сопротивлению цепи возбуждения R_s и параллельно включенного сопротивления R.

Действительно, из рассмотрения $\triangle CGA$ и $\triangle LGM$ следует:

$$\frac{\overline{LM}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{LC}}{\overline{GG}}.$$

Также для $\triangle\ AQN$ и $\triangle\ LQG$:

$$\frac{\overline{LG}}{\overline{CG}} = \frac{\overline{GQ}}{\overline{NQ}}.$$

Для $\triangle\ FBA$ и $\triangle\ FGC$:

$$\frac{\overline{GQ}}{\overline{NQ}} = \frac{\overline{CG}}{\overline{AB}},$$

и наконец для $\triangle\ ABD$ и $\triangle\ ANH$:

$$\frac{\overline{CG}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{NH}}{\overline{BD}}.$$

Таким образом можно написать:

$$\frac{\overline{LM}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{LG}}{\overline{CG}} = \frac{\overline{GQ}}{\overline{NQ}} = \frac{\overline{CG}}{\overline{AB}} = \frac{\overline{NH}}{\overline{BD}},$$

откуда получается:

$$\frac{1}{\overline{LM}} = \frac{\overline{NQ}}{\overline{AC}\cdot\overline{GQ}} = \frac{r+r_s}{r_s\cdot r} = \frac{1}{r_s} + \frac{1}{r},$$

и

$$\overline{NH} = \frac{\overline{CG}\cdot\overline{BD}}{\overline{AB}} = \frac{I_s\cdot r_s}{I_a} = R,$$

так как $I_a\cdot R = I_s\cdot r_s = I_{R_s}\cdot r$.

Кроме того, так как $\overline{AC} = \overline{BD}$, то из пропорции следует, что $\overline{LM} = \overline{NH}$, что дает возможность проверить правильность произведенного построения.

Меняя соотношение сил токов I_s и I_{R_s}, при неизменном I_a, можно таким же путем построить и другие точки кривой сопротивления R.

Таким образом отрезок $\overline{NH}$ дает общее сопротивление цепи возбуждения R. Общее же сопротивление машины получается равным $R + r_a$, где r_a, как уже было указано, сопротивление якоря, компенсационной обмотки и дополнительных полюсов.

Падение напряжения в цепи машины составляет $I_a(R + r_a)$. Если из ординаты кривой холостого хода K_1 вычесть это падение напряжения, то получится точка E_k. Произведя построение для других значений $(R_a + r_a)$ при $I_a = Const$, легко получить нагрузочную характеристику K_2.

Пусть требуется при неизменной нагрузке I_a понизить напряжение на зажимах генератора на ΔE. На диаграмме фиг. 178*a* это выразится передвижением по кривой K_2 от точки E_k к точке E_k'.

Если из точки E_k' опустить перпендикуляр на ось абсцисс, то он пересечет кривую сопротивлений в точке Q'. Расстояние по вертикали

между Q и Q' дает в масштабе сопротивлений уменьшение параллельно приключенного к обмотке возбуждения сопротивления R_s на величину Δr. Отрезок, отсекаемый перпендикулярами $\overline{QN}$ и $\overline{Q'N'}$ на оси абсцисс, дает изменение силы тока ΔI, причем ток регулирующего реостата R_s увеличится и будет равен $I_{R_s}+\Delta I$, а ток возбуждения уменьшится на ту же величину ΔI и будет равен $I_s-\Delta I$, вследствие чего и понизится напряжение на ΔE.

При включении регулятора поля по схеме фиг. 176, указанным построением вопрос о расчете регулирующего сопротивления вполне решается, так как найденные значения Δr дают величины сопротивлений ступеней реостата, соответствующие заданным значениям ΔE. При расчете регулятора поля по схеме фиг. 177, построение необходимо несколько изменить, принимая во внимание, что в данном случае удобнее оперировать не с сопротивлениями, а с проводимостями, которые в дальнейшем обозначаются посредством G.

Графическое решение для этого случая дано на фиг. 178*a*, причем масштаб оси абсцисс выбран тем же самым, что и на фиг. 178*b*. Здесь так же $\overline{Ob}=I_a$, $\overline{nb}=I_{R_s}$, $nn'=\Delta I$.

В удобном масштабе наносят значение проводимости $G_s=\frac{1}{r_s}$ и проводят горизонталь $\overline{cd}$, которая пересекает в точке g перпендикуляр, восстановленный из точки n. Если провести из начала координат O луч через точку g, то он пересечет продолжение перпендикуляра bd в точке q. Отрезок $\overline{dq}$ дает в выбранном масштабе значение проводимости регулятора для данного положения.

Напряжение на зажимах регулятора и обмотки возбуждения численно выражается котангенсом угла qOb.

Действительно,

$$\operatorname{cotg}\angle(qOb)=\frac{\overline{Ob}}{\overline{bq}}=\frac{I_s}{G_s}=\frac{I_s}{\frac{1}{r_s}}=I_s\cdot r_s=E_s,$$

или, что то же,

$$\operatorname{cotg}\angle(qOb)=\frac{I_a}{G_s+G}=E_s,$$

где G — проводимость регулирующего сопротивления.

При приключении следующей ступени регулятора поля, ток в нем возрастет на величину $\Delta I=\overline{gg'}$. Проведя из начала координат O луч через точку g', получают новое значение проводимости регулятора $\overline{dq'}$ и проводимость включаемой ступени $\Delta G=\overline{qq'}$. При этом построении сделано допущение, что отдельные ступени имеют то же напряжение, что и обмотка возбуждения, другими словами, не учитывается падение

напряжения в подводящих проводах. При соединении по схеме 176 это не имеет существенного значения, так как сопротивление подводящих проводов обычно включается в сопротивление последней ступени, что при расчете в надлежащей мере учитывается.

При соединении по схеме фиг. 177 дело осложняется тем, что сопротивление подводящих проводов при переключении числа ступеней оказывается приключенным к переменному числу параллельно соединенных сопротивлений.

Если обозначить проводимость подводящих проводов посредством G_l и проводимость регулирующего сопротивления — G'_{R_s}, то напряжение на зажимах регулятора можно выразить:

$$E_{R_s} = \frac{I_s}{G_s} - \frac{I_{R_s}}{G_l} = \frac{I_s - \frac{G_s}{G_l} \cdot I_{R_s}}{G_s} \qquad 324$$

и

$$E_{R_s} = \frac{I_{R_s}}{G'},$$

где G_s — проводимость обмотки возбуждения, I_s и I_{R_s} — соответствующее токи обмотки возбуждения и регулятора поля.

Эти два равенства графически изображены на фиг. 178 *b*. По оси абсцисс от начала координат отложено значение $\frac{G_s}{G_l} \cdot I_{R_s}$, что дает отрезок $\overline{Ou}$. Далее из точки u проводится луч, проходящий через точку g. Этот луч является геометрическим изображением первого уравнения для E_{R_s}.

Если продолжить этот луч до точки пересечения v с перпендикуляром, проходящим через точку b, то отрезок $\overline{dv}$, получающийся при этом, равен значению проводимости G_{R_s}' регулятора поля с учетом влияния подводящих проводов, как это следует из второго равенства для E_{R_s}.

Если приключить одну ступень, то регулирующий ток увеличится на ΔI, и тогда начальная точка для луча, соответствующего первому уравнению для E_{R_s}, перемещается по оси абсцисс на величину $\frac{G_s}{G_l} \cdot \Delta I$ в точку u', и луч, идущий от u', через точку g', соответствующую новому распределению тока I_a, встречает перпендикуляр $\overline{bd}$ в точке v'.

Отсюда следует, что значение проводимости приключенной ступени дается отрезком $\overline{vv'} = \Delta G$.

Таким путем можно определить сопротивления отдельных ступеней, а зная силу тока, протекающего по каждой ступени, можно рассчитать сечение употребляемого проводника.

Для определения этой силы тока проводят через точку v линию, параллельную оси абсцисс до встречи с лучом, проходящим через точку v' в точке w, и тогда отрезок $\overline{vw}$ дает силу тока в приключенной ступени. Полученная величина и является наибольшим значением силы тока, проходящего по рассматриваемой ступени, и расчет размеров ступени должен производиться по этому значению. Это следует из того, что при включении следующей ступени напряжение на регуляторе E_{R_s}, вследствие постоянства общего тока I_a, становится меньше, вместе с чем уменьшается и ток с рассматриваемой ступени.

b. Объемная мощность регулятора. — Число ступеней таких реостатов, как было указано выше, определяется в зависимости от тех пределов, в которых желательно производить регулировку напряжения. Обычно размеры отдельных ступеней, их сопротивления и силы тока, протекающие в каждой отдельной ступени, отличаются друг от друга, вследствие чего значение объемной мощности реостата P определяется как сумма соответствующих значений, вычисленных для каждой ступени в отдельности, или путем вычисления общего сопротивления. Такие способы подсчета представляют значительные неудобства, поэтому в дальнейшем приводится метод непосредственного подсчета значения P, причем для упрощения расчетов принимается, что число ступеней бесконечно велико и регулировка напряжения происходит плавно, а не скачками. Ошибка вследствие такого предположения на практике составляет всего несколько процентов, и ею вполне можно пренебречь. Заменяя в уравнении 324 значения проводимостей посредством сопротивления, получают

$$E_{R_s} = I_s \cdot r_s - I_{R_s} \cdot r_e; \quad E_{R_s} = I_{R_s} \cdot r'. \qquad 325$$

Мощность, поглощаемая реостатом, определяется из уравнения:

$$P = \int_{r_2'}^{r_1'} I_{R_s}^2 \cdot dr'.$$

Из уравнения 325 находят значения r', причем I_s заменяют его значением, найденным из соотношения $I_s = I_a - I_{R_s}$, тогда

$$r' = \frac{E_{R_s}}{I_{R_s}} = \frac{I_a \cdot r_s}{I_{R_s}} - r_s - r_e$$

и

$$dr' = -I_a \cdot r_s \frac{dI_{R_s}}{I^2_{R_s}},$$

откуда

$$P = \int_{I_{R_{s2}}}^{I_{R_{s1}}} I_{R_s}^2 \cdot I_a \cdot r_s \cdot \frac{-dI_{R_s}}{I^2_{R_s}}.$$

$$P = r_s \cdot I_a (I_{R_{s2}} - I_{R_{s1}}) = I_a (E_{s1} - E_{s2}). \qquad 326$$

Здесь E_{s1} и E_{s2} означают напряжения на концах обмотки возбуждения в моменты начала и конца регулировки. Полученная формула аналогична уравнению 31; только форм. 317 выражает мощность для случая изменения силы тока при постоянном напряжении, а форм. 326 — при постоянной силе тока I_a, но при изменении напряжения с E_{s1} до E_{s2}.

c. Потери в регуляторе. — Потери на нагревание в регуляторе поля при пользовании уравнением 325 определяются так:

$$P = I_{R_s}^2 \cdot r' = I_a^2 \frac{r_s^2 r'}{(r_s + r_l + r')^2}. \qquad 327$$

Если, как это было принято раньше, сила тока I_a остается постоянной, то потери получаются наибольшими в случае, если

$$r' = r_l + r_s, \qquad 328$$

что следует в результате приравнивания первой производной нулю Максимальное значение потерь равно:

$$P_{max} = I_a^2 \frac{1}{4} \cdot \frac{r_s^2}{r_s + r_l}. \qquad 329$$

Если пренебречь сопротивлением подводящих проводов, т. е. принять $r_l = 0$, то максимальное значение потерь получается равным:

$$P_{max} = \frac{1}{4} I_a^2 \cdot r_s = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_a^2}{G_s}. \qquad 330$$

Эта формула опять-таки аналогична уравнению 323.

§ 60. Графо-аналитический метод расчета регуляторов возбуждения. — Чисто графический метод расчета реостатов, служащих для регулировки силы тока возбуждения электрических машин, весьма сложен и кропотлив, и кроме того не всегда может быть применим для практических расчетов. В этом отношении более удобным является графо-аналитический метод, предложенный инженером Леманом (Leemann).

При применении этого метода различают следующие случаи расчета по определению числа ступеней реостатов для цепи возбуждения электрических машин:

a. Независимое возбуждение: *A. Генератор работает при постоянном напряжении*:

1) напряжение возбудителя постоянное,
2) напряжение возбудителя переменное.

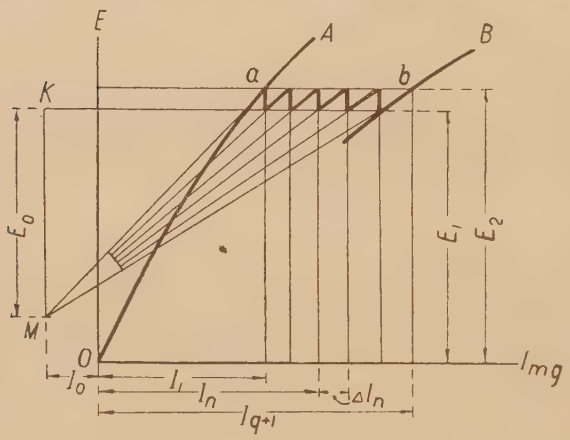
B. Генератор работает при переменном напряжении:

1) напряжение возбудителя постоянное,
2) напряжение возбудителя переменное.

b. Шунтовое возбуждение:

a. Независимое возбуждение. *A. Генератор работает при постоянном напряжении.*

На фиг. 179 изображены характеристика холостого хода (кривая *A*) и часть внешней характеристики для полной нагрузки машины (см. кривую *B*). Если какой-либо режим работы машины характеризуется на диаграмме фиг. 179 точкой, лежащей на прямой *ab*, то всякое изменение напряжения, если таковое происходит при постоянном возбуждении, изображается на диаграмме фиг. 179 в виде прямой, параллельной оси ординат.



Фиг. 179.

Пусть E_1 и E_2 — суть пределы напряжений, между которыми должно происходить изменение напряжения при регулировке напряжения посредством ступенчатого реостата возбуждения.

Через точки *a* и *b* проводят касательные к кривым *A* и *B*; эти касательные при пересечении образуют точку *M*. Абсцисса этой точки на диаграмме фиг. 179 изображена посредством I_0; отрезок же $MK = E_0$.

Пусть

$$\frac{E_1}{E_2} = \varepsilon, \text{ а } \frac{E_2}{E_0} = \varphi.$$

Из рассмотрения фиг. 179 легко установить, что

$$\frac{I_0 + I_n}{E_0} = \frac{\Delta I_n}{E_2 - E_1}.$$

Отсюда получается следующее выражение для приращения:

$$\Delta I_n = (I_0 + I_n)\left(\frac{E_2 - E_1}{E_0}\right),$$

или на основании введенных выше обозначений

$$\Delta I_n = (I_0 + I_n)(1 - \varepsilon)\varphi = (I_0 + I_n)\cdot\lambda, \qquad 331$$

где

$$\lambda = (1 - \varepsilon)\varphi.$$

Пользуясь формулой 331, можно легко установить соотношения между токами, соответствующими каждому положению подвижного контакта регулирующего реостата.

Если I_1 — есть сила тока, когда подвижной контакт находится в первом положении, то сила тока возбуждения I_2 для второго положения равняется:

$$I_2 = I_1 + \Delta I_1 = I_1 + (I_0 + I_1)\lambda = I_0\cdot\lambda + I_1(1 + \lambda);$$

для третьего положения:

$$I_3 = I_2 + \Delta I_2 = I_2 + (I_0 + I_2)\lambda = I_0\cdot\lambda + I_1(1 + \lambda) + I_0\cdot\lambda + I_0\cdot\lambda^2 +$$
$$+ I_1(1 + \lambda)\lambda = 2I_0\cdot\lambda + I_0\cdot\lambda^2 + I_1(1 + \lambda)^2,$$

а для n-го положения:

$$I_n = I_{n-1} + \Delta I_{n-1} = I_0[(1 + \lambda)^{n-1} - 1] + I_1(1 + \lambda)^{n-1}. \qquad 332$$

Так как число ступеней реостата равно числу положений минус единица, т. е.

$$m = n - 1, \qquad 333$$

то формула 332 может быть представлена таким образом:

$$I_n = I_0[(1 + \lambda)^m - 1] + I_1(1 + \lambda)^m = (1 + \lambda)^m(I_0 + I_1) - I_0. \qquad 334$$

Последнее выражение и служит для определения числа ступеней:

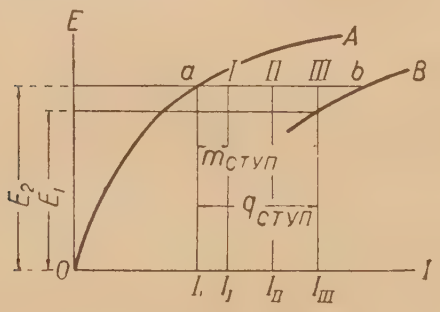
$$m = \frac{\ln(I_n + I_0) - \ln(I_1 + I_0)}{\ln(1 + \lambda)}. \qquad 335$$

На основании этого вывода следует, что для поддержания напряжения на зажимах генератора в пределах от E_2 до E_1 при всех изменениях нагрузки между точками a и b (см. фиг. 180) необходимо

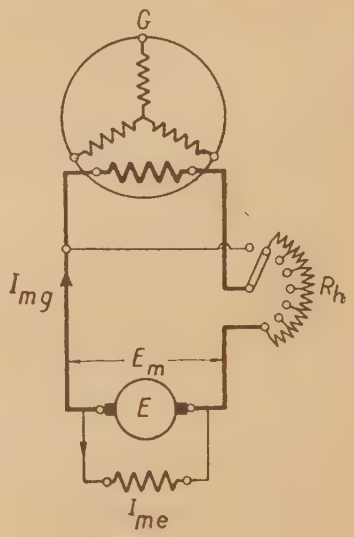
число ступеней регулирующего реостата, включенного в главную цепь возбуждения или в цепь возбуждения возбудителя, сделать равным:

$$q = \frac{\ln(I_b + I_0) - \ln(I_a + I_0)}{\ln(1 + \lambda)}.$$

С производственной точки зрения не всегда бывает рациональным или возможным выполнить каждую ступень с таким сопротивлением, которое соответствует расчету. В таком случае довольствуются тем, что все ступени реостата для области регулировки *ab* (см. фиг. 180) делят на ограниченное число секций (4, 5, 6 и более в зависимости от условий), причем в каждой секции ступени выполняют с одинаковым сопротивлением. Границы секций I, II, III... (см. фиг. 180) обычно выбираются в зависимости от



Фиг. 180.



Фиг. 181.

допустимой нагрузки для различных сортаментов материала, идущего на изготовление элементов сопротивления.

Таким образом в задачу расчета реостата возбуждения входит также и определение числа ступеней для каждой секции. Здесь различают два случая, когда возбудитель генератора имеет постоянное напряжение, и когда напряжение возбудителя изменяется.

1. Постоянное напряжение возбудителя. — Схема такого способа возбуждения представлена на фиг. 181. Чтобы определить число ступеней для каждой секции, здесь применяется формула 335, причем в этой формуле под I_1 и I_n должны подразумеваться токи, соответствующие первой и последней ступени рассчитываемой секции. Определение сопротивления каждой ступени производится весьма просто. Для точки *a* общее сопротивление цепи возбуждения равно:

$$R_1 = \frac{E_m}{I_1},$$

где E_m — постоянное напряжение возбудителя; для точки I сопротивление цепи возбуждения составляет:

$$R_I = \frac{E_m}{I_I}.$$

Таким образом общее сопротивление ступеней первой секции равняется:

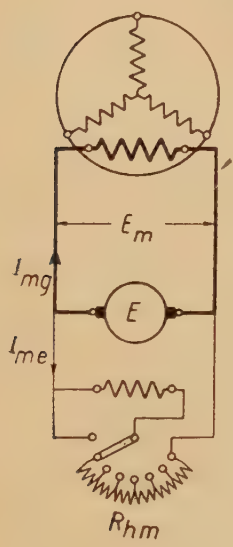
$$r_I = R_1 - R_I = \frac{E_m}{I_1} - \frac{E_m}{I_I} = E_m \cdot \frac{I_I - I_1}{I_I \cdot I_1},$$

а сопротивление каждой ступени:

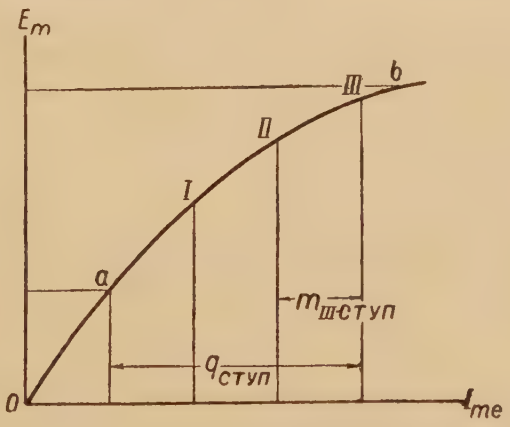
$$r_1 = \frac{r_I}{m_1}.$$

2. Напряжение возбудителя переменное. — В этом случае регулировка напряжения у генератора производится по схеме фиг. 182. Как видно из фиг. 182, регулирующий реостат введен в цепь обмотки возбуждения возбудителя.

Для этого случая возбуждения общее число ступеней реостата определяется по формуле 336.



Фиг. 182.



Фиг. 183.

Необходимо отметить, что здесь число ступеней не должно допускаться меньшим, чем в случае 1, как это бывает часто на практике.

Чтобы определить число секций и сопротивления отдельных ступеней реостата, необходимо знать зависимость напряжения возбудителя E_m от силы тока возбуждения возбудителя I_m для различных токов главной цепи возбуждения генератора. На фиг. 183 изображена графически эта зависимость в виде кривой для случаев режима генератора, пределы которого характеризуютя точками a и b фиг. 180.

Построение этой кривой производится на основании следующих соображений: как видно из схемы фиг. 182, обмотка возбуждения генератора присоединена непосредственно к зажимам возбудителя, поэтому сила тока в главной цепи возбуждения устанавливается равной:

$$I_n = \frac{E_m}{R_m} \text{ или } E_m = R_m \cdot I_n,$$

где R_m — сопротивление обмотки возбуждения, которое можно считать постоянным при установившемся тепловом состоянии машины. В случае, если подвижной контакт регулирующего реостата находится в другом $n+x$ положении, напряжение на зажимах генератора должно быть равно

$$E_{n+x} = R_m \cdot I_{n+x}.$$

Таким образом получается, что

$$\frac{E_n}{E_{n+x}} = \frac{I_n}{I_{n+x}}. \qquad 336$$

Основываясь на этом равенстве и пользуясь формулой 334, находят:

$$\frac{E_n}{E_{n+x}} = \frac{(I_0 + I_1)(1+\lambda)^{n-1} - I_0}{(I_0 + I_1)(1+\lambda)^{n-1+x} - I_0}.$$

Для первого положения подвижного контакта ($n = 1$, $n - 1 = 0$) получается $(1+\lambda)^{n-1} = 1$. Отсюда следует, что

$$\frac{E_1}{E_n} = \frac{I_1}{(I_0 + I_1)(1+\lambda)^{n-1} - I_0}$$

$$n - 1 = m = \ln \frac{E_n \cdot I_1 + E_1 I_0}{E_1 (I_0 + I_1)} \cdot \frac{1}{E_n (1+\lambda)}. \qquad 337$$

Сопротивления отдельных ступеней и общее сопротивление каждой секции определяются следующим образом. Если обозначить посредством I ток возбуждения возбудителя, то точке a, характеризующей возбуждение генератора, соответствует сопротивление цепи возбуждения возбудителя:

$$R_1 = \frac{E_1}{I_1}.$$

Для последнего контакта первой секции сопротивление равняется:

$$R_I = \frac{E_I}{I_I}.$$

Таким образом общее сопротивление ступеней первой секции реостата составляет:

$$r_I = R_1 - R_I ,$$

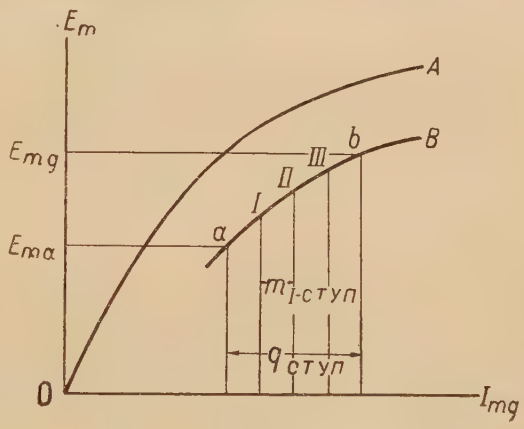
а сопротивление каждой ступени получается равным:

$$r_1 = \frac{r_I}{m_1} = \frac{R_1 - R_I}{m_1} ,$$

где m_1 — число ступеней первой секции, определяемое по формуле 337.

Аналогичным образом находятся сопротивления ступеней и других секций.

В. Генератор работает при переменном напряжении. — Этот случай относится главным образом к таким машинам, которые должны поддерживать ток постоянным для всех напряжений в пределах от E_a до E_b (см. фиг. 184), как это имеет место, например, в машинах, служащих для электролиза.



Фиг. 184.

Число ступеней реостата, необходимое для регулировки напряжения в выше указанных пределах, может быть найдено, если допустить, что при переходе от одной ступени к другой напряжение изменяется на ξ часть от предыдущего значения, т. е.

$$E_n = E_{n-1}(1+\xi) = E_{n-2}(1+\xi)^2 = \ldots = E_1(1+\xi)^{n-1}. \qquad 338$$

Отсюда и находится число ступеней $m = n - 1$:

$$m = n - 1 = \frac{\ln E_n - \ln E_1}{\ln(1+\xi)} . \qquad 339$$

Выражение, служащее для определения тока возбуждения, получается также в виде:

$$I_n = I_1(1+\xi)^m.$$

При расчете реостата возбуждения здесь, как и в предыдущих случаях, приходится ступени реостата разбивать на секции; при этом необходимо различать следующие условия возбуждения:

1) при постоянном напряжении,

2) при переменном напряжении.

Если напряжение возбудителя остается постоянным при возбуждении машины, то определение числа ступеней производится по формуле 338.

При переменном напряжении возбудителя с целью определения ступеней и секций приходится на основании диаграммы фиг. 184 построить кривую зависимости напряжения на зажимах возбудителя E_n от тока возбуждения I_m (см. фиг. 184); тогда число ступеней можно определить, пользуясь соотношениями:

$$\frac{E_1}{R_m} = I_{m1};$$

$$\frac{E_n}{R_m} = I_{mn} = I_{m1}(1+\xi)^m,$$

и формулой 338, из которой следует

$$\frac{E_n}{E_1} = (1+\xi)^m$$

и

$$m = \frac{\ln E_n - \ln E_1}{\ln(1+\xi)}. \qquad 340$$

Общее замечание. Вышеприведенные формулы служат для расчета ступеней реостата для регулировки напряжения согласно заданным требованиям в пределах, характеризующихся точками a и b на диаграммах фиг. 184; при практическом же осуществлении реостата обычно приходится устраивать еще несколько дополнительных ступеней, которые позволили бы производить регулировку напряжения, выходящего за пределы a и b.

b. Шунтовое возбуждение. На диаграмме фиг. 185 изображен графически процесс регулировки напряжения генератора с шунтовым возбуждением. В этом случае изменение напряжения на зажимах генератора при постоянном сопротивлении цепи возбуждения в зависимости от нагрузки на диаграмме возбуждения представляется в виде отрезков прямых, соединяющих концы ординат с началом координат, точкой O.

Если место пересечения касательных, проведенных к отрезкам кривых, представляющих нагрузочные характеристики при включении различных ступеней реостата, обозначить посредством M, а отношение величин, изображенных на диаграмме фиг. 185, представить таким образом:

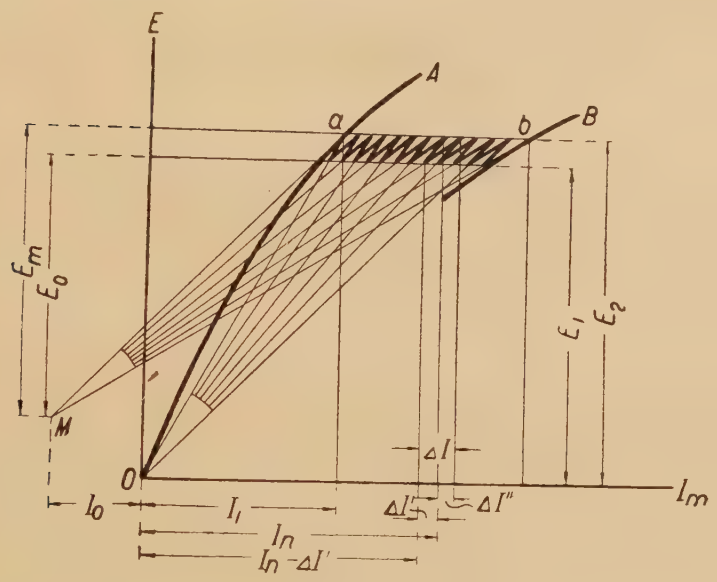
$$\frac{E_1}{E_2} = \varepsilon; \quad \frac{E_0}{E_m} = \varepsilon_m$$

и, кроме того, воспользоваться обозначениями, приведенными на диаграмме фиг. 185, то можно легко установить следующие соотношения:

$$\frac{I_n}{E_2}=\frac{\Delta I'}{E_2-E_1};\qquad \Delta I'=\frac{E_2-E_1}{E_2}\cdot I_n=(1-\varepsilon)I_n;$$

$$\frac{I_0+I_n+\Delta I''}{E_m}=\frac{\Delta I}{E_m-E_0};$$

$$\Delta I_n=\frac{E_m-E_0}{E_m}(I_0+I_n+\Delta I'')=(1-\varepsilon_m)(I_0+I_n+\Delta I'').$$



Фиг. 185.

Так как

$$\Delta I_n''=\Delta I-\Delta I_n'$$

то

$$\Delta I_0''=(1-\varepsilon_m)(I_0+I_n+\Delta I'')-(1-\varepsilon)I_n;$$

отсюда находится

$$\Delta I''=I_n\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}-1\right)+I_0\left(\frac{1}{\varepsilon_m}-1\right) \qquad 341$$

или

$$\Delta I''=I_n\cdot K+N,$$

где

$$K=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}-1$$

и

$$N=I_0\left(\frac{1}{\varepsilon_m}-1\right).$$

Пользуясь только что приведенными равенствами, можно теперь установить закон, согласно которому происходит изменение тока возбуждения. Пусть I_1 — ток возбуждения, соответствующий первому положению подвижного контакта; тогда для второго положения получается:

$$I_2 = I_1 + \Delta I_1'' = I_1 + I_1 K + N = I_1 (1 + K) + N;$$

для третьего положения:

$$I_3 = I_2 + \Delta I_2'' = I_2 + I_2 K + N = I_1 (1 + K) + N + I_1 (1 + K) + \\ + KN + N = I_1 (1 + K)^2 + N (2 + K),$$

а для n-го положения подвижного контакта:

$$I_n = I_{n-1} + \Delta I_{n-1}'' = I_1 (1 + K)^{n-1} + N (2 + K) [(1 + K)^{n-3} + \\ + (1 + K)^{n-5} + (1 + K)^{n-7} + \cdots] + N; \qquad 342$$

(для случая четного числа контактов), и

$$I_n = I_1 (1 + K)^{n-1} + N (2 + K) [(1 + K)^{n-3} + (1 + K)^{n-5} + \\ + (1 + K)^{n-7} + \cdots] \qquad 343$$

(для случая нечетного числа контактов).

При большом числе ступеней разница между значениями силы тока I_n, получаемыми для четного и нечетного чисел контактов, получается очень малой, поэтому практически величиной N как слагаемым можно пренебречь, и тогда выражение для I_n, если обозначить посредством

$$x = 1 + K,$$
$$\phi = 2 + K,$$
$$m = n - 1,$$

приобретает следующий более простой вид:

$$I_n = I_1 \cdot x^m + N \cdot \phi (x^{m-2} + x^{m-4} + x^{m-6} + x^{m-8} + \cdots). \qquad 344$$

Выражение в скобках есть не что иное, как геометрическая прогрессия.

Здесь надо различать два случая: 1) когда m есть четное число и 2) когда m является нечетным числом. Но так как на практике при большом числе контактов не важно, будет ли число их, например, 61 или 62, то можно полагать число ступеней m нечетным, так как для этого случая получается наиболее простая формула.

Общая формула, выражающая сумму геометрической прогрессии, пишется, как известно, таким образом:

$$S = a\frac{1-q^x}{1-q}.$$

Для случая, когда m есть число нечетное,

$$a = x;\ q = x^2;\ x = \frac{m+1}{2},$$

откуда

$$S = x\frac{1-x^{2\left(\frac{m+1}{2}\right)}}{1-x^2} = \frac{x-x^{m+2}}{1-x^2}.$$

Эта сумма, введенная в формулу 344, дает следующее выражение:

$$I_n = I_1 \cdot x^m + N \cdot \phi\frac{x-x^{m+2}}{1-x^2}, \qquad 345$$

откуда после преобразования находят:

$$m = \ln\frac{I_n - \frac{N+x}{1-x^2}}{I_a - \frac{N+x^2}{1-x^2}} \cdot \frac{1}{\ln x}. \qquad 346$$

Обычно при расчете реостата область ab делят на столько секций, на сколько находят удобным, и с помощью формулы 345 быстро находят число ступеней, заключающихся в каждой секции.

Сопротивление каждой ступени определяется так же, как это уже было указано ранее для других условий возбуждения.

Если теперь хотят найти число ступеней для того случая, когда машина работает при изменяющемся напряжении, то прибегают к диаграмме фиг. 184 и к формуле 338, которые одинаково пригодны для расчета шунтового возбуждения.

Чтобы рассчитать реостат, нет надобности воспроизводить всю диаграмму фиг. 179 или фиг. 185. Здесь достаточно остановиться на крайних пределах напряжения, на максимуме или минимуме последнего, между которыми хотят регулировать, и провести касательные $\overline{aM}$ и $\overline{bM}$, которые позволяют найти I_0. Остальные же величины определяются аналитическим методом, посредством вышеприведенных формул. Необходимо, однако, обратить внимание на два обстоятельства: 1) I_0 — положительно налево от оси ординат и отрицательно вправо от этой оси; 2) значения ε, x и ε_m должны быть вычислены с возможно большей точностью (до многих десятичных знаков).

Чисто графический метод, помимо сложности, обладает еще тем недостатком, что он не всегда может быть применим, так как он позволяет найти число ступеней для определенного данного предела изменения напряжения $\Delta E = E_n - E_1$ и не дает возможности определять это изменение напряжения по заданному числу контактов, тогда как число контактов, которое получается при расчете по вышеприведенным формулам, не всегда может совпасть с числом контактов коммутаторных досок реостатов, имеющихся на складах или представленных на чертеже. Обычно в этих случаях выбирают из имеющихся в распоряжении ту коммутаторную доску, у которой число контактов всего ближе подходит к числу n, получаемому по формуле. Для инженера же иногда бывает важно знать, какое колебание напряжения ΔE будет происходить при выбранной коммутаторной доске.

Формулы 336—338 и 340 позволяют легко вычислять эти колебания напряжения для известного данного значения m.

Что касается формулы 345, то оперировать с нею не так легко, поэтому необходимо придать ей более простое выражение.

Исходя из выражения 346 и подставляя вместо x, N и ψ соответствующие выражения, получают следующее уравнение:

$$I_n = I_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^{m+2} - \frac{I_0}{\varepsilon_m}\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^{m+2} - I_1\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^{m+1} + I_1\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^{m} + \\ + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}(I_n - I_0) + \frac{I_0}{\varepsilon_m}\cdot\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}. \qquad 347$$

Из рассмотрения диаграммы фиг. 185 можно установить следующую пропорцию:

$$\frac{E_0 + F}{E_m + F} = \frac{E_1}{E_2} = \varepsilon.$$

Величины E_2, E_m и F суть постоянные, которые не зависят от числа ступеней реостата.

Из предыдущего выражения вытекает:

$$E_0 + F = \varepsilon E_m + \varepsilon F;$$
$$\frac{E_0}{E_m} + \frac{F}{E_m} = \varepsilon + \varepsilon\frac{F}{E_m}.$$

Если обозначить посредством

$$\delta = \frac{F}{E_m}, \qquad 348$$

то выражение для $\frac{E_0}{E_m} = \varepsilon_m$ приобретает следующий вид:

$$\varepsilon_m = \varepsilon + \varepsilon\delta - \delta. \qquad 349$$

Заменяя в формуле 348 ε_m только что полученным выражением, находят:

$$I_n = \frac{I_0}{\left(1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^{m+2}} - \frac{I_0}{\varepsilon\left(1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^{m+3}} - \frac{I_0}{\left(1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^{m+1}} +$$

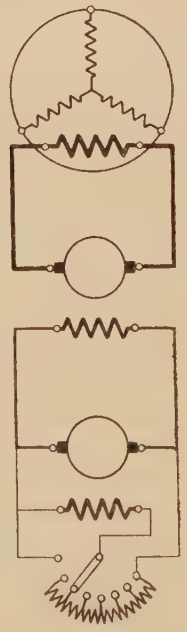
$$+ \frac{I_1}{\left(1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^{m}} + \frac{I_n - I_0}{1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}} + \frac{I_0}{\varepsilon\left(1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}\right)^{2}}.$$

Если обозначить посредством x выражение $1+\delta-\frac{\delta}{\varepsilon}$ и умножить обе части последнего уравнения на x^{m+3}, то получают следующее выражение:

$$I_n \cdot x^{m+3} - \frac{I_0}{\varepsilon} x^{m+2} - (I_n - I_0) x^{m+1} - I_1 \cdot x^3 + I_1 \cdot x^2 - I_0 \cdot x + \frac{I_0}{\varepsilon} = 0. \quad 350$$

Это уравнение разрешается путем последовательного приближения, для чего задаются различными значениями ε (δ — постоянная величина, определяемая по диаграмме) и затем вычисляют значения x и подставляют их в уравнение 350. Это уравнение для большинства случаев представляет не нуль, а некоторое определенное значение y, которое откладывают в системе прямоугольных координат в функции x. По трем, четырем найденным значениям y и нанесенным по ним точкам на диаграмме строится кривая, пересечение которой с осью абсцисс определяет искомое действительное значение x.

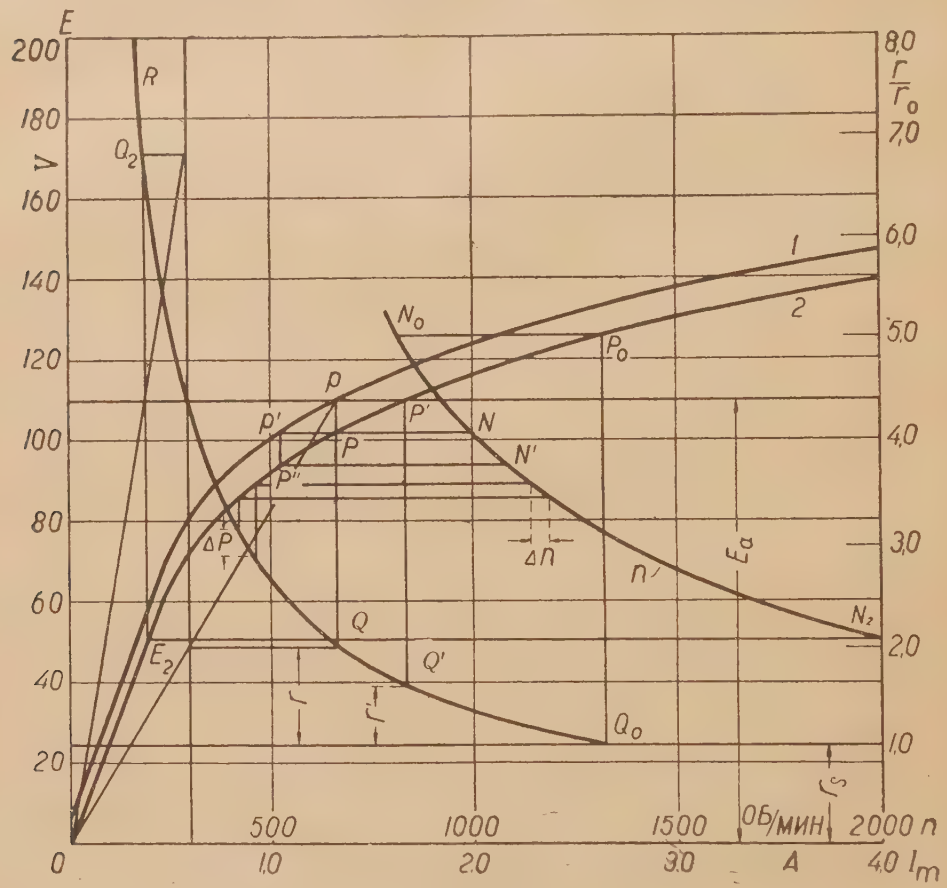
Вышеприведенный метод применим также для расчета регулирующего реостата и для того случая, когда возбуждение машины осуществляется посредством двух возбудителей, соединенных в каскад, как это изображено схематически на фиг. 186.



Фиг. 186.

§ 61. Регуляторы поля для двигателей. — При увеличении нагрузки шунтового двигателя сила тока, потребляемого двигателем, а вследствие этого и омическое падение напряжения, также возрастают, что вызывает уменьшение электродвижущей силы, хотя напряжение на зажимах двигателя остается постоянным. Так как электродвижущая сила пропорциональна произведению магнитного потока на число оборотов, а магнитный поток остается почти постоянным, то при увеличении нагрузки двигателя число оборотов его падает. Поэтому чтобы довести число оборотов до прежнего значения, необходимо в данном случае

уменьшить в том же самом отношении магнитный поток двигателя, что достигается включением сопротивления в цепь возбуждения. Часто встречается необходимость в еще более значительном повышении числа оборотов по сравнению с номинальным значением, иногда до двухкратного или даже трехкратного, для чего в цепь возбуждения



Фиг. 187.

двигателя приходится включать еще большее сопротивление, чтобы значительно ослабить магнитный поток полюсов.

Разница между регуляторами поля для генераторов и для двигателей состоит только в том, что в последнем случае они служат для изменения числа оборотов двигателя, поэтому ступени такого регулятора приходится рассчитывать так, чтобы при переходе подвижного контакта с одной ступени на другую число оборотов двигателя изменялось в одном и том же отношении. В качестве примера подобного расчета на фиг. 187 приведены соответствующие построения для рас-

чета регулятора поля шунтового двигателя. Здесь кривая *1* представляет собою кривую магнитного потока двигателя при номинальном числе оборотов, пересчитанную на масштаб напряжения, т. е. в настоящем виде это есть кривая зависимости электродвижущей силы двигателя при номинальном числе оборотов от тока возбуждения. Кривая *2* представляет ту же зависимость, что и кривая *1*, но построенную для случая идеального холостого хода, т. е. когда сила тока в якоре двигателя равна нулю. Пусть напряжение на зажимах двигателя равно E_{kn}. Прежде всего строят кривую сопротивлений R тем же способом, что и в случае постороннего возбуждения при напряжении E_{kn}; после этого вычерчивают кривую скорости вращения двигателя, для чего по оси абсцисс откладывают значения числа оборотов двигателя, соответствующие различным значениям магнитного потока (электродвижущей силы), каковые значения откладывают по оси ординат. Пусть номинальное число оборотов двигателя составляет $1\,000\ \frac{обор.}{мин.}$, что соответствует точке N кривой n, имеющей ту же ординату, что и точка P кривой *1*, соответствующая номинальной работе двигателя. Сопротивление регулятора в данном случае должно быть равно r и определяется точкой Q на кривой R. При постоянном напряжении произведение числа оборотов на магнитный поток тоже постоянно, следовательно, кривая числа оборотов двигателя представляет собою прямоугольную гиперболу, которую легко построить. За наивысшее число оборотов, которого можно достичь регулировкой, на чертеже принято двойное номинальное, и ему соответствует точка N_2 на кривой n, точка P_2 на кривой *1* и точка Q_2 на кривой R. Путем выключения всего реостата число оборотов двигателя можно понизить до значения, соответствующего точке N_0.

Значение сопротивления, необходимого для того, чтобы поддерживать постоянным число оборотов двигателя, начиная с холостого хода двигателя до полной нагрузки, определяется следующим образом. Из точки P проводят вертикаль до пересечения с кривой *2* в точке p, через которую в свою очередь проводят горизонталь, пересекающую кривую *1* в точке P'. Точке P' на кривой R соответствует точка Q' с сопротивлением реостата равным r', так что предел регулировки составляет $r - r'$. Если через точку P влево провести горизонталь до точки p', оттуда перейти по вертикали в точку P'', а затем по горизонтали вправо в точку N' кривой n, то таким образом находят число оборотов холостого хода, соответствующее нормальной скорости двигателя. Число ступеней регулятора определяется в зависимости от изменения числа оборотов при переключении с одной ступени реостата на другую, которое можно допустить, или которое определяется

условиями работы. Каждому изменению числа оборотов соответствует свое изменение сопротивления реостата, которое легко определить, производя вышеупомянутые построения для промежуточных точек.

§ 62. Регуляторы тока главной цепи двигателей. — Вышеописанные регуляторы поля для двигателей позволяют повышать число оборотов двигателя до пределов, которые определяются безопасной работой установки, однако с их помощью нельзя установить скорость вращения двигателя значительно ниже номинальной. В тех случаях, когда число оборотов двигателя приходится регулировать в пределах, лежащих ниже номинальной скорости вращения, в цепь якоря необходимо включать соответствующее сопротивление. Процессы, происходящие при этом в двигателе, были уже рассмотрены ранее в главах VII и VIII, и все соотношения, выведенные тогда, остаются справедливыми и для данного случая. Предполагая, что вращающий момент, а следовательно, и сила тока постоянны, из уравнения 145 получают следующее соотношение для двух соседних ступеней:

$$E_{kn} = E_\nu + I \cdot R_\nu = E_{\nu+1} + I \cdot R_{\nu+1},$$

откуда, пользуясь уравнением 147, находят:

$$E_{kn} = \frac{\omega_\nu}{\omega_s} E_{kn} + I \cdot R_\nu = \frac{\omega_{\nu+1}}{\omega_s} E_{kn} + I \cdot R_{\nu+1}.$$

Исключая отсюда величину I, легко находят следующее выражение:

$$\frac{r_{\nu+1}}{r_\nu} = \frac{\omega_s - \omega_{\nu+1}}{\omega_s - \omega_\nu}.$$

Относительно изменений скорости вращения двигателя остается прежнее предположение, что при переключении ступеней реостата скорость вращения двигателя изменяется всегда на одну и ту же величину или в одном и том же отношении. В этом случае ход расчета как для сериес-двигателей, так и для шунтовых остается один и тот же, вследствие сделанного предположения, что сила тока, а в двигателях сериес и поток, постоянны. Здесь пользуются графическими методами расчета, которые изображены на фигурах 135 и 149 *b* и которые имеют то большое преимущество, что дают наглядное изображение пределов регулировки и разбивки на ступени. Если нагрузочный крутящий момент изменяется с изменением числа оборотов, то графические методы расчета еще более необходимы. В случае шунтовых двигателей применение аналитического метода вызвало бы

напрасное усложнение расчета; в двигателях сериес, напротив, вследствие зависимости поля от силы тока в якоре, удобнее пользоваться графическим методом расчета. При этом целесообразнее всего сначала построить кривую оборотов двигателя при помощи магнитной характеристики и нанести на ней те ступени скорости вращения, которые желательно получить.

Если нет особой необходимости в плавном изменении числа оборотов двигателя, то для регулировки скорости вращения можно пользоваться пусковым реостатом. Получающиеся при этом ступени для шунтовых двигателей могут быть определены непосредственно из фиг. 137, а для двигателей сериес — из фиг. 135 при помощи вышеупомянутой кривой оборотов двигателя. Само собою понятно, что в этом случае пусковой реостат в соответствующих пределах должен быть рассчитан на продолжительную нагрузку.

Регулировка асинхронных двигателей может производиться также с помощью пускового реостата или другого, включенного на его место, с тем только условием, что эти реостаты должны быть рассчитаны так, чтобы с их помощью можно было получать нужные изменения числа оборотов. В этом случае ход расчета остается тот же, что и приведенный ранее для пусковых реостатов; только в отношении нагрева регулирующий реостат должен быть рассчитан на продолжительную нагрузку.

§ 63. Сопротивления для прерывателей цепи возбуждения. — При отключении от источника тока обмотки возбуждения во избежание появлений опасных перенапряжений не оставляются разомкнутыми, а всегда замыкаются или накоротко на себя, или на особое сопротивление, которое обычно называют защитным сопротивлением для обмотки возбуждения. Обычно это сопротивление снабжается специальным переключателем или т. н. прерывателем поля, посредством которого производится присоединение защитного сопротивления к обмотке возбуждения в начале разрыва цепи возбуждения. Часто, однако, такой переключатель совсем отсутствует; в этих случаях защитное сопротивление помещается в реостате, и замыкание обмотки возбуждения на защитное сопротивление производится при разрыве цепи возбуждения посредством подвижной контактной рукоятки реостата.

К прерывателям поля ставится требование, чтобы они имели такое устройство, при котором цепь возбуждения не могла бы быть разомкнутой до тех пор, пока к обмотке возбуждения не будет приключено защитное сопротивление. В противном случае разрыв цепи возбуждения сопровождается появлением перенапряжений и образованием вольтовой дуги на контактах. Вольтова дуга действует разрушающе

на контакты. Что касается влияния образования дуги на защитное сопротивление, то таковое является, пожалуй, благоприятным, так как вольтова дуга несколько ограничивает напряжение, которое устанавливается на концах защитного сопротивления в момент разрыва цепи возбуждения. В дальнейшем при расчете сопротивления это благоприятное действие вольтовой дуги не принимается во внимание и считается, что обмотка возбуждения сначала замыкается на защитное сопротивление, а потом отключается от сети.

Пусть по обмотке возбуждения перед выключением протекает ток I_{mo}, тогда при замыкании обмотки на защитное сопротивление в первый момент ток в обмотке остается прежним, а затем постепенно убывает. Пусть в момент времени t после размыкания цепи возбуждения сила тока, протекающего по обмотке, составляет I_m ампер, чему соответствует магнитный поток каждого полюса Φ_1, и пусть число последовательно соединенных витков всех обмоток полюсов равно w_m. Если сопротивление обмотки равно r_m, а защитное сопротивление — r, то на основании закона Ома можно написать следующее дифференциальное уравнение:

$$I_m(r+r_m)+w_m\frac{d\Phi_m}{dt}=0. \qquad 351$$

Второй член этого уравнения, представляющий собою изменение по времени нитного потока, который сцеплен с витками обмотки возбуждения, и взятый со знаком минус, может быть назван электродвижущей силой обмотки возбуждения и обозначен посредством E_s, т. е.

$$E_s=-w_m\frac{d\Phi_m}{dt}. \qquad 352$$

Мощность в данный момент времени равна $E_s\cdot I_m$ и представляет собою мощность электромагнитной энергии, накопленной в обмотке. Сила тока в обмотке постепенно уменьшается, и она достигает нуля теоретически по прошествии бесконечно большого промежутка времени. Первоначальный запас энергии, накопленный в обмотке, имеет, понятно, конечное значение, и на основании предыдущего может быть определен при помощи выражения

$$A=\int_0^\infty E_s\cdot I_m\cdot dt, \qquad 353$$

которое на основании уравнений 351 и 352 принимает вид:

$$A=\int_0^\infty (r_s+r)I_m^2dt. \qquad 354$$

Это уравнение показывает, что магнитная энергия поглощается в сопротивлении всей цепи $(r_s + r)$ и превращается в тепло. В дальнейшем представляет интерес нагрев только добавочного сопротивления r и количество поглощаемого им тепла, которое составляет:

$$\int_0^\infty r \cdot I_m^2 \cdot dt = \frac{r}{r + r_m} \cdot A.$$

Как уже упоминалось ранее, в момент разрыва цепи возбуждения защитное сопротивление r может находиться под напряжением и нагреваться от проходящего при этом тока. Если E_{kn} — напряжение на концах сопротивления r и t_o—время, в течение которого при переключении обмотки возбуждения сопротивление r оказывается под этим напряжением, то возникающее в сопротивлении количество тепла составляет $\frac{E_{kn}^2}{r} \cdot t_o$. Если t_o, а также и время, в течение которого по обмотке протекает ток заметной силы, малы по сравнению с постоянной времени нагрева сопротивления, каковое предположение практически вполне справедливо, то теплоемкость сопротивления может быть принята равной:

$$Q = \frac{r}{r + r_s} A + \frac{E_{kn}^2}{r} t_o = P_w \cdot T. \qquad 355$$

Здесь P_w есть та тепловая мощность, которую сопротивление может продолжительно выдержать и на основании которой может быть определено необходимое количество материала. Постоянная времени нагрева T предполагается заданной, время t_o может быть или определено опытным путем, или им можно соответствующим образом задаться; следовательно, для определения значения P_w остается в уравнении 355 вычислить только значение A.

Значение количества магнитной энергии A, накопленной в обмотке возбуждения, может быть определено по формуле 353, однако смысл этой формулы недостаточно ясен, поэтому выражают в ней E_s через Φ_1 согласно уравнению 352 и одновременно изменяют пределы интегрирования, зная, что при $t = 0$ магнитный поток достигает максимального значения Φ_1, а при $t = \infty$ он равен нулю, тогда

$$A = \int_0^{\Phi_1} I_m \cdot w_m \cdot d\Phi_1. \qquad 355а$$

Это наиболее употребительная форма для выражения запаса магнитной энергии цепи, содержащей железо.

В дальнейшем предполагается, что для данной машины известна зависимость электродвижущей силы якоря от силы тока возбуждения. Если обозначить электродвижущую силу якоря, наводимую мгновенными изменениями магнитного потока, пронизывающего обмотку якоря посредством E_a, и вспомнить, что в технической системе измерений размерность потока выражается в $Volt \times sec$, то на основании этого соотношение между потоком и электродвижущей силой якоря можно представить следующим образом:

$$w_m \cdot \Phi_m = E \cdot T_e \qquad 356$$

и, таким образом, получить окончательное выражение для магнитной энергии:

$$A = T_e \int_0^E I_m dE. \qquad 357$$

Здесь T_e выражает некоторый период времени. Величина T_e называется постоянной времени возбуждения электрической машины; она подсчитывается по формулам:

для машины постоянного тока

$$T_e = \sigma \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2a}{p} \cdot \frac{w_m}{w_a} \cdot \frac{1}{\omega}; \qquad 358$$

для синхронных машин

$$T_e = \sigma \cdot \sqrt{2} \frac{m}{k} \cdot \frac{a}{p} \cdot \frac{w_m}{w_a} \cdot \frac{1}{\omega}. \qquad 359$$

Здесь означают

σ — коэффициент магнитного рассеяния,

a — число параллельных ветвей обмотки якоря (для машин постоянного тока для одной половины якоря),

p — число пар полюсов,

m — число фаз,

w_a — общее число витков обмотки якоря,

k — обмоточный коэффициент,

ω — механическая угловая скорость вращающихся частей машины.

Из рассмотрения уравнения 357 следует, что если известна кривая $E_a = f(I_m)$, то подъинтегральное выражение $I_m dE$ представляет собою площадь, ограниченную двумя горизонталями, проведенными на расстоянии E и $E_a + dE$ от оси абсцисс, осью ординат и частью кривой $E = f(I_m)$, а интеграл

$$T_e \int_0^{E_a} I_m \cdot dE$$

представляет площадь, ограниченную кривой, осью ординат и линией, проведенной параллельно оси абсцисс. Эта площадь заштрихована горизонтально на фиг. 172, и из рассмотрения этой фигуры можно вывести следующее: если регулятор поля машины должен изменять напряжение от точки E_0 до точки E_1, то мощность, поглощаемая им за весь период регулировки, равна двойной площади $0E_0\ E_1$. В точке E_1 обмотка обладает еще запасом электромагнитной энергии A, который равен площади OE_1B, умноженной на время T_e; определив, таким образом, значение A, нетрудно произвести соответствующий расчет защитного сопротивления r.

Для любой точки E, согласно уравнению 353, справедливо уравнение:

$$P_0 = 2\left[\int_0^{I_m} E dI_m - \frac{1}{2} EI_m\right]. \qquad 360$$

Путем интегрирования по частям уравнения 357 или из непосредственного рассмотрения фиг. 172 следует

$$P_w = \int_0^{E_a} I_m \cdot dE = E \cdot I_m - \int_0^{I_m} E dI_m. \qquad 361$$

Воспользовавшись обоими последними уравнениями, находят

$$P_0 + 2P_w = E \cdot I_m. \qquad 362$$

Если подсчитать значение P_0 для всех точек кривой $E = f(I_m)$, как это изображено на фиг. 174, то из уравнения 362 можно легко определить соответствующие значения F и нанести их также в виде кривой (фиг. 174). Таким образом для любой точки кривой можно по соответствующему значению P_w и T_e, определяемому на основании данных обмотки якоря, вычислить запас электромагнитной энергии обмотки возбуждения.

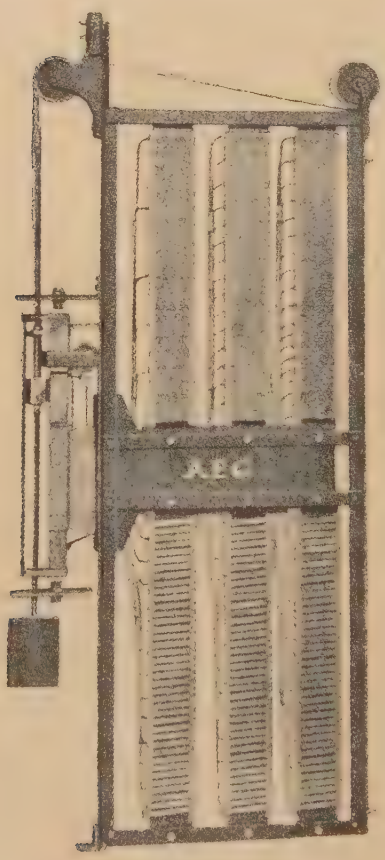
*

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ОСВЕТИТЕЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

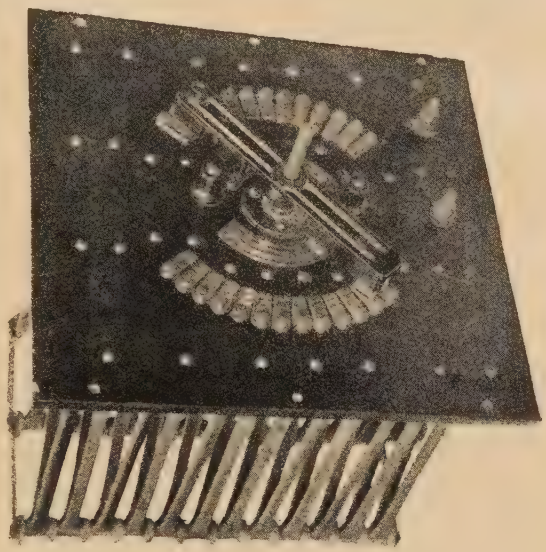
*

Реостаты, включаемые в цепь осветительных устройств (дуговых ламп, ламп накаливания), называются ламповыми или осветительными регуляторами. По своему устройству они мало отличаются от обыкновенных регулирующих реостатов. В большинстве случаев эти реостаты выполняются из металлических элементов сопротивления и имеют воздушное охлаждение. Наиболее распространенные реостаты, реостаты для небольших дуговых ламп, выполняются из круглой проволоки, наматываемой на остов из огнеупорного изоляционного материала. Регулировка сопротивления реостата осуществляется путем перемещения металлического хомутика. Но подобная регулировка применяется лишь в тех случаях, когда реостат включается в качестве добавочного сопротивления, служащего для устойчивого горения лампы. Если же реостат предназначается и для регулировки светового потока лампы, то он снабжается ступенчатым переключателем. Одно из подобных устройств изображено на фиг. 188. В реостатах, предназначаемых для мощных дуговых ламп, сопротивления выполняются из ленты. Фиг. 189 изображает реостат от прожектора Сперри (Sperry).



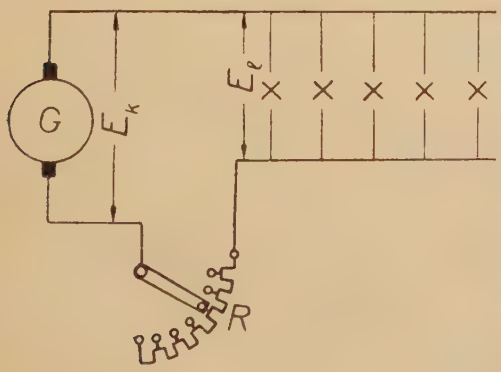
Фиг. 188.

Осветительные регуляторы предназначаются для поддержания напряжения на зажимах электрических источников света, для поддержания постоянства силы тока и для увеличения устойчивости горения ламп с вольтовой дугой (в этом случае реостат называется также балластным сопротивлением) и, наконец, для регулировки силы света в известных пределах.



Фиг. 189.

§ 64. Регуляторы напряжения для ламп накаливания. — В электрических установках, которые служат для питания ламп накаливания, напряжение на зажимах ламп должно быть, по возможности, постоянным, так как даже небольшие изменения напряжения вызывают сравнительно большие колебания силы света. Если к осветительной установке ток от источника подводится посредством длинных проводников, то в последних создается падение напряжения, изменяющееся в зависимости от нагрузки; поэтому для поддержания постоянства напряжения на зажимах ламп приходится или регулировать напряжение у источника тока, или в цепь ламп включать добавочное регулирующееся сопротивление. В большинстве случаев более удобным в практическом отношении является второй способ поддержания постоянства напряжения на зажимах ламп посредством регулирующих реостатов.



Фиг. 190.

К реостатам, служащим для поддержания постоянства напряжения на зажимах ламп, обычно предъявляется требование, чтобы во время регулировки напряжения, при переходе с одной ступени на другую

колебание напряжения не выходило за пределы заданных величин. В соответствии с этим требованием реостат должен быть рассчитан как на максимальный нагрузочный ток, так и на токи меньших нагрузок. На фиг. 190 изображена схема питания осветительной установки от генератора G.

Пусть напряжение на зажимах ламп, которое должно поддерживаться постоянным, равно E_e, напряжение генератора — E_k, а максимальная нагрузка ламп составляет I_0. При этих условиях падение напряжения в соединительных проводах равняется $e_л = I_0 \cdot R_л$, где $R_л$ — общее сопротивление прямого и обратного проводов.

Напряжение, которое должно быть поглощено для того, чтобы установить напряжение на зажимах ламп, равное E_e, может быть легко найдено из равенства

$$E_k - E_e = e_л + I_0 \cdot R_0 = I_0 (R_л + R_0), \qquad 363$$

где R_0 — сопротивление реостата (см. фиг. 190).

Если теперь часть ламп выключить, то вследствие уменьшения нагрузочного тока падение напряжения как в питательной линии, так и в реостате уменьшится, и напряжение на зажимах ламп повысится. Пусть в этом случае сила тока нагрузки равна I_1; тогда это повышение напряжения будет равно:

$$\Delta E = (I_0 - I_1)\ (R_л + R_0), \qquad 364$$

и для того, чтобы на зажимах ламп установить прежнее напряжение, необходимо включить следующую ступень реостата с тем, чтобы

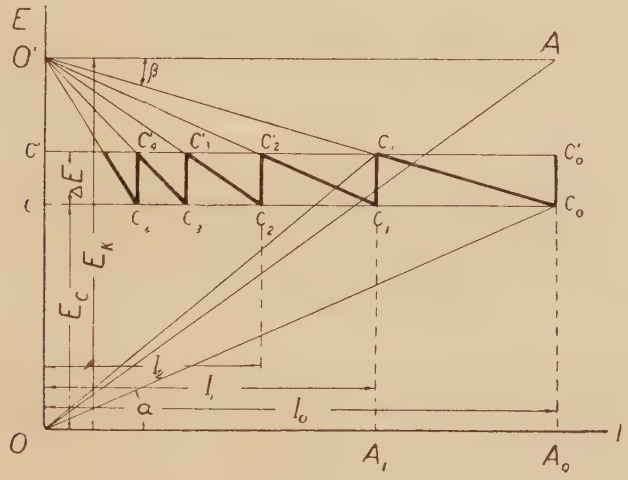
$$E_k - E_e = I_1\ (R_л + R_1).$$

При дальнейшем уменьшении ламповой нагрузки для поддержания постоянства напряжения приходится устанавливать сопротивления реостата соответственно равные $R_2, R_3 \ldots R_n$.

Процесс регулирования напряжения на зажимах ламп графически можно представить при помощи диаграммы, изображенной на фиг. 191. На диаграмме этой по оси абсцисс отложены значения токов нагрузки, а по оси ординат значения напряжений E_k, E_e и ΔE, причем $E_k = \overline{OO_1}$; $E_e = \overline{OC}$ и $\Delta E = Const = \overline{CC'}$.

Соединив точку C_0, представляющую конец ординаты напряжения E_e при силе тока $I_0 = \overline{OA_0}$, с началом координат O, получают прямую OC_0; тангенс угла, образуемого этой прямой с осью абсцисс, изображает в соответствующем масштабе общее сопротивление всех включен-

ных ламп. Отрезок $\overline{C_0O'}$, получающийся при соединении прямой точки C_0 с точкой O', образует угол, тангенс которого представляет сумму сопротивлений соединительных проводов и реостата, т. е. $R_л + R_0$. Легко понять, что пересечение прямой $\overline{C_0O'}$ с прямой $\overline{C'C_0'}$ дает точку C_1', абсцисса которой $\overline{OA_1}$ выражает ток I_1, а ордината $A_0C'_0$ — напряжение $E_e + \Delta E$. При силах тока нагрузки, находящихся в пределах от I_0 до I_1, зависимость напряжения на зажимах включенных ламп от силы тока на диаграмме представляется графически в виде отрезка прямой $\overline{C_0C_1'}$.



Фиг. 191.

Для того чтобы напряжение на зажимах ламп при силе тока I_1 довести снова до значения E_e, необходимо сопротивление реостата в цепи ламп изменить и сделать его равным R_1, при этом на диаграмме фиг. 191 R находится как тангенс угла, образуемого отрезком $\overline{O'C_1}$ с прямой $O'A$ ($\operatorname{tg}\beta = R_л + R_1$).

Аналогичным образом можно определить сопротивление реостата для последующих положений подвижного контакта его при дальнейшем уменьшении силы тока ламповой нагрузки. Так как колебания напряжения при переключении ступеней реостата допускаются очень малыми (1 — 2% от E_e), то для определения ступеней прибегают к вычерчиванию лишь одной диаграммы, представляющей зависимость падения напряжения в реостате и соединительных проводниках от силы тока нагрузки, причем масштаб ординат выбирается значительно большим.

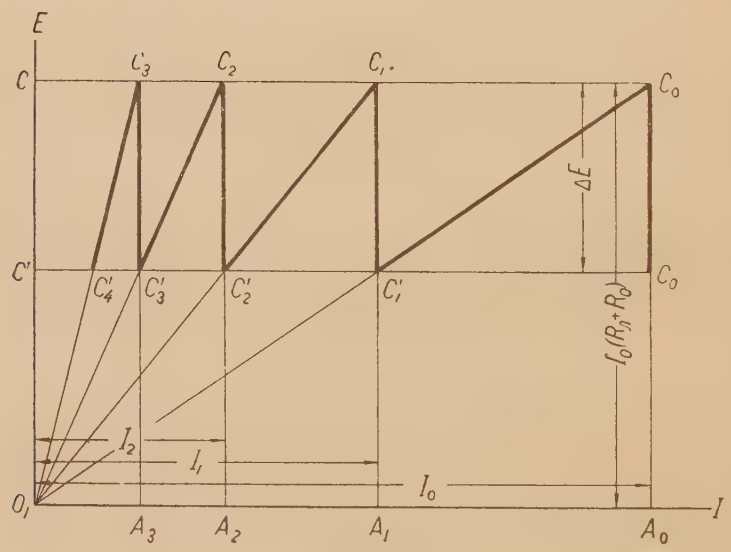
На фиг. 192 приведено подобное построение. По оси ординат откладываются отрезки $\overline{O_1C} = I_0(R_л + R_0)$ и $\overline{C'C} = \Delta E$; из точек C и

C_1' проводят прямые, параллельные оси абсцисс. Соединив точки C_0, C_1, C_2 с началом координат O_1, находят: $\operatorname{tg}\beta_0 = R_л + R_0$, $\operatorname{tg}\beta_1 = R_л + R_1$, $\operatorname{tg}\beta_2 = R_л + R_2$ и т. д. путем построения, которое легко понять из рассмотрения диаграммы фиг. 192.

Как видно из диаграммы:

$$\frac{\operatorname{tg}\beta_0}{\operatorname{tg}\beta_1} = \frac{\operatorname{tg}\beta_1}{\operatorname{tg}\beta_2} = \frac{\operatorname{tg}\beta_2}{\operatorname{tg}\beta_3} = \cdots = \frac{C_0'A_0'}{C_0A_0'} = Const.$$

$$\frac{I(R_{0л} + R_0) - \Delta E}{I_0(R_л + R_0)}$$



Фиг. 192.

или

$$\frac{R_л + R_0}{R_л + R_1} = \frac{R_л + R_1}{R_л + R_2} = \cdots = \frac{R_л + R_{n-1}}{R_л + R_n} = \frac{I_0(R_л + R_0) - \Delta E}{I_0(R_л + R_0)}. \qquad 365$$

Если обозначить посредством

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{I_0(R_л + R_0)},$$

то предыдущее выражение принимает вид:

$$\frac{R_л + R_0}{R_л + R_1} = \frac{R_л + R_1}{R_л + R_2} = \cdots = \frac{R_л + R_{n-1}}{R_л + R_n} = 1 - \varepsilon. \qquad 366$$

Отсюда можно легко найти значения сопротивлений реостата для каждого положения подвижного контакта:

$$\left.\begin{aligned} R_1 + R_л &= \frac{R_л + R_0}{1-\varepsilon}; \\ R_2 + R_л &= \frac{R_л + R_1}{1-\varepsilon} = \frac{R_л + R_0}{(1-\varepsilon^2)}; \\ R_3 + R_л &= \frac{R_л + R_2}{1-\varepsilon} = \frac{R_л + R_0}{(1-\varepsilon)^3}; \\ &\dots\dots\dots\dots \\ R_\nu + R_л &= \frac{R_л + R^0}{(1-\varepsilon)^\nu}; \end{aligned}\right\} \quad 367$$

при $\nu = n$

$$R_n + R_л = \frac{R_л + R^0}{(1-\varepsilon)^n}. \quad 368$$

Сопротивления отдельных ступеней сопротивления получаются равными:

$$r_0 = R_0$$

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= R_1 - R_0 = (R_л + R_0)\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}; \\ r_2 &= R_2 - R_1 = (R_л + R_0)\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^2} \\ &\dots\dots\dots\dots \\ r_n &= R_n - R_{n-1} = (R_л + R_0)\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^n}. \end{aligned}\right\} \quad 369$$

Что касается сил тока для различных случаев включения реостата, то таковые приобретают следующие значения:

$$\left.\begin{aligned} I_0 &= \frac{I_0(R_л + R_0)}{R_л + R_0}; \\ I_1 &= \frac{I_0(R_л + R_0) - \Delta E}{R_л + R_0} = I_0(1-\varepsilon). \\ I_2 &= \frac{I_1(R_л + R_1) - \Delta E}{R_л + R_0} = I_0(1-\varepsilon)^2; \\ &\dots\dots\dots\dots \\ I_n &= \frac{I_{n-1}(R_л + R_0) - \Delta E}{R_л + R_0} = I_0(1-\varepsilon)^n. \end{aligned}\right\} \quad 370$$

Наибольшая мощность, поглощаемая каждой ступенью, составляет:

$$\left.\begin{aligned}
&P_0 = I_0^2 \cdot r_0 = I_0^2 \cdot R_0. \\
&P_1 = I_1^2 \cdot r_1 = I_0^2 (1-\varepsilon)^2 (R_л + R_0) \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} = I_0^2 (R_л + R_0)\, \varepsilon (1-\varepsilon). \\
&P_2 = I_2^2 \cdot r_2 = I_0^2 (1-\varepsilon)^4 (R_л + R_0 \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^4} = I_0^2 (R_л + R_0)\, \varepsilon (1-\varepsilon)^2 \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&P_n = I_0^2 (1-\varepsilon)^{2n} (R_л + R_0) \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)^n} = I_0^2 (R_л + R_0)\, \varepsilon (1-\varepsilon)^n.
\end{aligned}\right\} \quad 371$$

На основании последних формул производится определение геометрических размеров сопротивлений отдельных ступеней и расчет последних в отношении нагрева.

Как известно, сумма наибольших мощностей, поглощаемых сопротивлениями отдельных ступеней, представляет так называемую объемную мощность реостата, в данном случае эта величина равняется:

$$P = \sum_{\nu=0}^{\nu=n} P_\nu = I_0^2 (R_л + R_0)\, \varepsilon \sum_{\nu=0}^{\nu=n} (1-\varepsilon)^\nu =$$

$$= I_0^2 (R_л + R_0)\, \varepsilon \frac{(1-\varepsilon)^n - 1}{(1-\varepsilon) - 1} = I_0^2 (R_л + R_0) [1 - (1-\varepsilon)^n] \quad . 372$$

Если реостат снабдить дополнительной ступенью, при введении которой имелась бы возможность повысить напряжение E_e до значения $E_e + \Delta E$ при максимальной нагрузке I_0, то реостат должен был тогда иметь сопротивление при включении этой ступени;

$$R'_0 = R_0 - \frac{\Delta E}{I_0};$$

сопротивление же этой дополнительной ступени, и ступени, соответствующей 0-му положению подвижного контакта, соответственно равны:

$$r_0' = R_0'$$

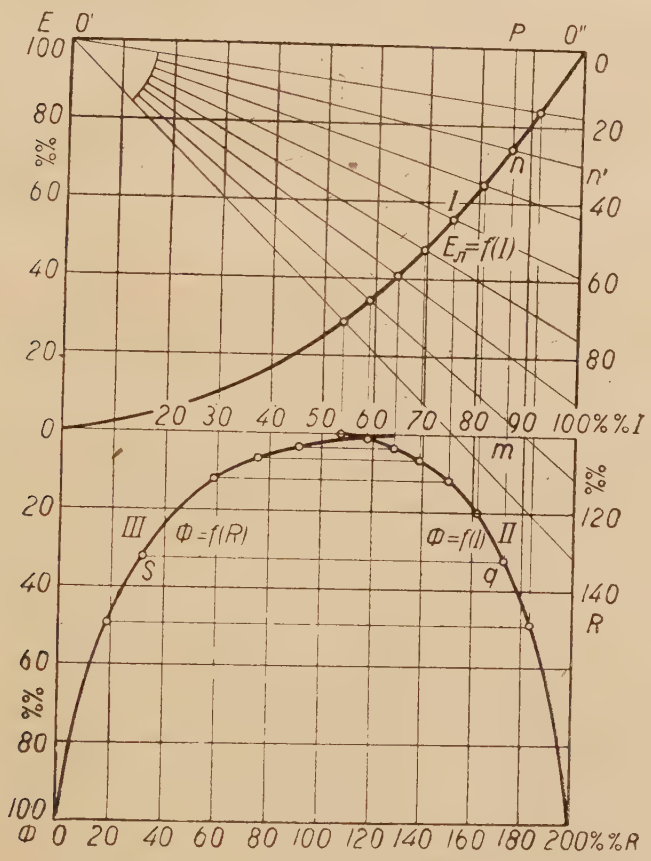
и

$$r_0 = \frac{\Delta E}{I_0}$$

§ 65. Реостаты для регулирования силы света ламп накаливания. — Более сложным является расчет реостатов, предназначаемых для регулировки силы света электрических источников света ламп накаливания. Для определения как числа ступеней, так и сопротивления

каждой ступени необходимо знать электрические и световые характеристики ламп, а также требования в отношении самой регулировки силы света.

a. Характеристики ламп накаливания. — На фиг. 193 изображены характеристики ламп с газовым наполнением. Кривая I изображает напряжение на зажимах лампы в процентах от номиналь-



Фиг. 193.

ного питательного напряжения в функции тока, проходящего через лампу; этот последний измеряется также в процентах от номинального поглощаемого тока; кроме того, предполагается, что напряжение сети соответствует номинальному напряжению лампы. Кривая II дает зависимость между световым потоком, испускаемым лампой и поглощаемым током. Этот световой поток, как и предыдущие величины, выражен в процентах от номинального значения. Абсолютное значение номинального тока легко определяется для каждого типа лампы, когда

известна ее потребляемая мощность и номинальное напряжение. Номинальный световой поток обыкновенно дается или может быть легко найден путем фотометрирования.

С помощью этих данных имеется возможность установить соотношение, характеризующее зависимость между световым потоком и добавочным сопротивлением R, включенным последовательно с лампой, при условии, что номинальное напряжение приложено к зажимам этой установки. Пусть I — сила тока, проходящего в цепи и представленного на диаграмме фиг. 193 посредством абсциссы om; напряжение сети на той же диаграмме изображено посредством отрезка mp и таковое же на зажимах лампы через mn; ясно что np дает падение напряжения, вызываемое сопротивлением, включенным последовательно с лампой. Таким образом, сопротивление может быть выражено посредством отношения:

$$\frac{np}{o'p} = \frac{np}{om},$$

т. е. посредством тангенса угла $o''o'n'$. Графически эта величина выражается посредством длины отрезка $o''n'$, отсекаемого на правой стороне диаграммы посредством прямой, выходящей из o' и проходящей через точку n. Найдя значения R для различных I и пользуясь кривой II, представляющей зависимость светового потока лампы от силы тока, можно легко начертить искомую характеристику $\Phi = \varphi(R)$; эта характеристика изображена на диаграмме посредством кривой III. Абсциссы этой кривой равны соответствующим отрезкам $o''n'$, причем, как и в предыдущих случаях, сопротивления выражены в процентах от сопротивления лампы, горящей при номинальном напряжении.

Кривые, которые можно получить тем же методом как для случая маломощных ламп с газовым наполнением, так и для случая пустотных ламп с металлической нитью, весьма сходны с предыдущими для световых потоков, заключенных в пределах от 100 до 45% от номинального потока, и отклоняются лишь для меньших значений потока; последний гораздо скорее убывает в последнем случае, нежели в первом.

Полное построение этих кривых в каждом частном случае, однако, довольно длительно и сопровождается ошибками, присущими графическому методу, в особенности, когда диаграммы вычерчиваются быстро и в малом масштабе. Во избежание этих недостатков, рекомендуется пользоваться таблицами 30, 31 и 32, в которых приведены данные относительно светового потока ламп накаливания (газовых и пустотных) в зависимости от сопротивления, включаемого последовательно в их цепь. Эти таблицы позволяют для большинства случаев делать быстрый расчет, не прибегая к графическому методу.

Кривые, имея свои координаты, выраженные в процентах, применяются без изменения для случая некоторого количества идентичных ламп, соединенных параллельно или последовательно при условии, что они имеют одинаковые напряжения на зажимах, силы тока, сопротивления и световые потоки, выраженные в относительных единицах. Надо отметить также, что те же кривые может, равным образом, представлять и световой поток, испускаемый лампой, или силу света; эти две величины пропорциональны каково бы ни было распределение силы света вокруг лампы.

Таблица 30

Лампы с газовым наполнением, мощностью свыше 100 W; сопротивление в процентах от сопротивления лампы, которое необходимо включить добавочно для того, чтобы получить световой поток в процентах от номинального потока

Световой поток в %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
90	0,3	0,7	1,0	1,4	1,7	2,1	2,4	2,8	31	3,5
80	3,8	4,2	4,5	4,9	5,2	5,6	6,9	6,3	6,6	7,0
70	7,3	7,7	8,0	8,4	8,7	9,1	9,4	9,8	10,1	10,5
60	10,9	11,3	11,7	12,1	12,5	12,9	13,3	13,7	14.1	14,5
50	15,0	15,4	15 9	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,6	19,1
40	19,7	20,2	20,8	21,3	21,9	22,4	23,0	23,6	24,2	24 8
30	25,5	26,3	27.0	27,7	28,4	29,2	29,9	30,6	31,4	32,1
20	33,0	33,9	34,8	35,8	36,8	37,8	38,8	40,0	41,2	42,7
10	44.2	45,7	47,5	49 3	51,3	53,3	55,5	57,8	60,4	63.3
0	66.2	69,3	73,0	77,0	81,8	87,3	93,9	102,5	113,5	133,0

Способ пользования таблицей. — Для получения светового потока в 86% от номинального значения требуется сопротивление в 4,9% от сопротивления лампы; значение этого сопротивления находится на пересечении линии, соответствующей 80% со столбцом для 6%.

Способ пользования таблицами 31 и 32 тот же, что и в данном случае.

b. Определение сопротивлений ступеней реостата. — При помощи ранее полученных характеристик ламп легко определить сопротивление ступеней реостата, осуществляющего заранее заданный закон изменения светового потока ламп. Ниже приводится расчет для

Таблица 31

Лампы с газовым наполнением, мощностью ниже 100 W; сопротивление в процентах от сопротивления лампы, которое необходимо включить добавочно для получения светового потока в процентах от номинального потока

Световой поток в %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
90	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3	1,6	1,6	2,1	2,3	2,6
80	2,9	3,1	3,4	3,6	3,9	4,2	4,4	4,7	4,9	5,2
70	5,6	6,0	6,3	6,7	7,1	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0
60	9,4	9,8	10,2	10,6	11,0	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0
50	13,4	13,9	14,3	14,8	15,2	16,7	16,1	16,6	17,0	17,5
40	18,1	18,6	19,2	19,8	20,3	21,0	21,5	22,1	22,6	23,2
30	23,9	24,6	26,3	26,0	26,7	27,5	28,4	29,2	30,1	31,0
20	32,0	33,0	34,0	35,1	36,2	37,4	38,7	40,0	41,3	42,6
10	44,0	46,5	47,1	48,8	50,6	52,5	54,5	56,6	59,2	61,9
0	64,7	67,6	70,7	73,9	77,4	81,3	85,8	91,0	98,1	117,0

Таблица 32

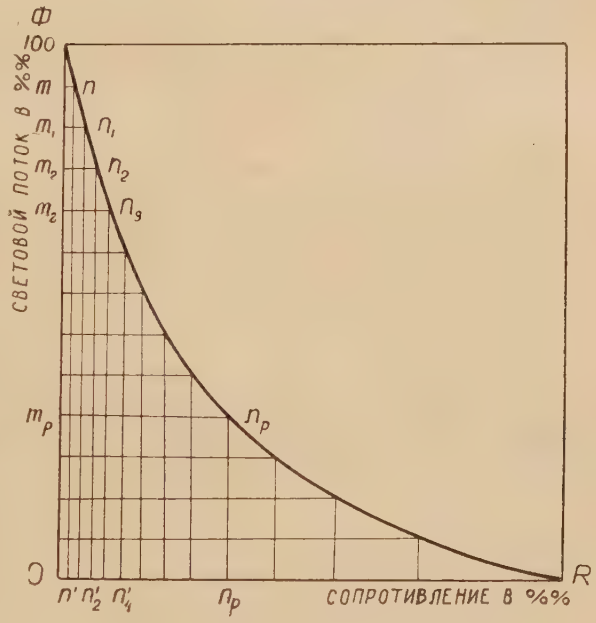
Пустотные лампы; сопротивление в процентах от сопротивления лампы, которое необходимо включить добавочно для получения светового потока в процентах от номинального потока

Световой поток в %	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
90	0,3	0,7	1,0	1,4	1,7	2,1	2,4	2,8	3,1	3,5
80	3,8	4,2	4,5	4,9	5,2	5,6	5,9	6,3	6 6	7,0
70	7,3	7,7	8,0	8,4	8,7	9,1	9,4	9,8	10,1	10,5
60	10,9	11,3	11,7	12,1	12,5	12,9	13,3	13,7	14,1	14 5
50	14,9	15,4	15,8	16,3	16,7	17,2	17,6	18,1	18,5	19,0
40	19,6	20,2	20,8	21,4	22,0	22,7	23,5	24,2	25,0	25,7
30	26,5	27,4	28,3	29,2	30,1	31,0	32,0	33,0	34,0	35,0
20	36,0	37,0	38,0	39,1	40,3	41,5	42,7	44,1	45,6	47,1
10	48,6	50,1	51,7	53,3	55,0	56,8	58,7	60,7	62,8	65,0
0	67,4	70,0	72,9	76,2	80,0	84,3	89,1	94,6	101,3	110,8

двух случаев: *a*) когда световой поток изменяется равномерными скачками, *b*) когда световой поток изменяется по закону геометрической прогрессии (по логарифмическому закону).

1. Равномерное изменение светового потока. — Для определения сопротивлений реостата пользуются кривой, представляющей световой поток в функции последовательно включенного добавочного сопротивления (см. фиг. 194); делят наибольшую ординату на некоторое количество равных частей и находят на кривой точки соответствующие этим делениям ординаты. Абсциссы найденных точек дают последовательные значения сопротивления реостата в процентах от сопротивления лампы, работающей при нормальном напряжении.

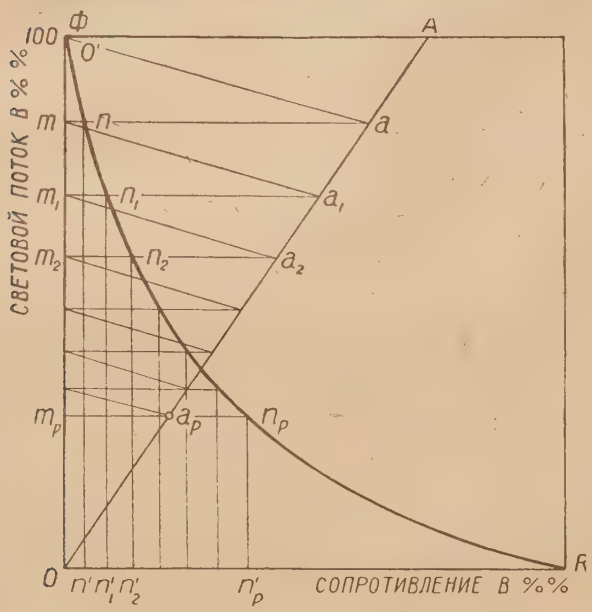
2. Регулировка силы света по закону логарифмов. — Изменение светового потока и следовательно силы света равномерными скачками имеет то неудобство, что это изменение неоднообразно для глаза. Чтобы создать для последнего впечатление равномерного изменения освещенности, нужно, чтобы логарифм освещенности изменялся линейно. Можно также осуществить такое изменение светового потока, при котором каждая последующая освещенность изменялась бы на ϕ процентов от предыдущей.



Фиг. 194.

Графически эта задача разрешается способом, указанным ниже (см. фиг. 195). Строится сначала характеристика, затем проводят прямую под произвольным углом $\overline{OA}$, проходящую через начало координат. От точки o' откладывают по оси световых потоков, в отрицательном направлении, отрезок $\overline{o'm}$, представляющий ϕ % от максимального светового потока. Горизонталь, проведенная через точку m, встречает кривую в точке n, а прямую $\overline{OA}$ в точке a. Проекция n' точки n на оси сопротивлений определяет первое значение сопротивления реостата. Для получения следующих значений проводят через точку m прямую $\overline{ma_1}$, параллельную к прямой $\overline{o'a}$, которая пересекает прямую $\overline{OA}$ в точке a_1. Через a_1 проводят горизонталь $\overline{a_1m_1}$,

которая пересекает кривую в точке n_1. Проекция n'_1 точки n_1 на ось абсцисс дает значение сопротивления для второго контакта реостата.

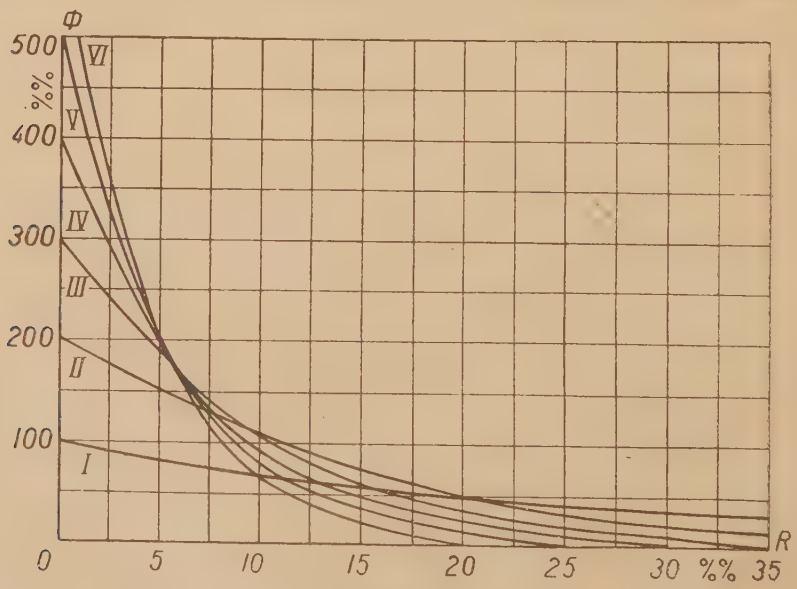


Фиг. 195.

Продолжая то же построение, находят все последующие значения сопротивлений реостата. В самом деле, из рассмотрения диаграммы фиг. 195 имеем следующее отношение:

$$\frac{\overline{om}}{\overline{oo'}} = \frac{\overline{om_1}}{\overline{om}} = \frac{\overline{om_2}}{\overline{om_1}} = \ldots\ldots\ldots = \frac{\overline{om_{n+1}}}{\overline{om_n}} = \frac{100-\psi}{100}.$$

Когда значение, выбранное для ψ, мало, то могут явиться затруднения в графическом построении. В этом случае применяют приближенный графический метод, делая построения для $\psi' = n \cdot \psi$ и находя сопротивления



Фиг. 196.

для ψ путем интерполяции. Значения сопротивлений, определяемые этим приближенным методом, получаются несколько ниже таковых же, которые находятся посредством прямого метода.

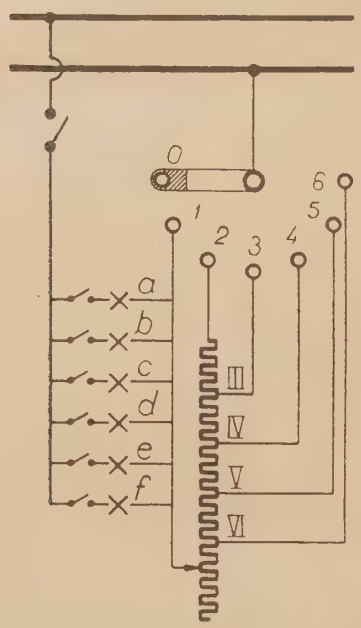
c. Регулировка светового потока группы параллельно соединенных ламп. — Этот случай часто встречается в практике. Для рассмотрения его пользуются кривыми I и II фиг. 193, относящимися к одной лампе.

Для данного напряжения, предполагаемого постоянным, приложенного к зажимам нескольких одинаковых параллельно включенных ламп, очевидно, что вся поглощаемая мощность и общий световой поток пропорциональны числу употребляемых ламп. Это замечание позволяет сделать выводы относительно построения кривых для нескольких одинаковых групп ламп, включаемых параллельно. Чтобы облегчить нахождение зависимости общего светового потока от сопротивления, вводимого последовательно в цепь ламп, допускают, кроме того, что световой поток делается равным нулю при напряжении в 30 % от номинального значения.

Применяя к этим новым кривым графический способ, применяющийся при построении кривой III (фиг. 193), получают семейство кривых, изображенных на фиг. 196; эти кривые дают значение общего светового потока при одновременном включении 1, 2, 3, 4, 5 и 6 ламп или одинаковых групп ламп в функции общего добавочного сопротивления. Сопротивления и световые потоки выражены в относительных единицах, соответствующих одной лампе или наименьшему числу ламп параллельно соединенных. Эти кривые показывают значительное влияние сопротивления, даже малого, на весь изучаемый поток, особенно когда число ламп велико. Легко увидеть, что если добавочное сопротивление цепи равно 10,7 % от сопротивления группы ламп, принятых за единицу, то две такие группы не дают освещения большего, чем одна, питаемая от сети без добавочного сопротивления; также, когда это сопротивление составляет 19,5 %, освещенность получается та же, что от одной или двух групп; наконец, когда в питающей цепи включено сопротивление в 9,5 % от того, что представляет группа ламп в номинальных условиях, общий световой поток, увеличивающийся одинаково как при включении 2, так и 3 групп, однако, уменьшается, благодаря включению 4, 5 и 6 групп и принимает для последнего числа групп то же значение, что и для одной группы.

Вышеописанные выводы можно использовать для практических целей, в случае освещения сцен театров, где встречается необходимость не только в регулировке силы света, но и в изменении окраски световых лучей. Действительно, как показывают кривые фиг. 196, посредством последовательного включения реостата имеется возможность

световой поток поддерживать постоянным независимо от числа включенных ламп или групп ламп. По мере включения большего числа групп ламп напряжение на их зажимах, если общий световой поток при этом остается неизменным, должно уменьшаться, вследствие чего температура накала нити лампы понижается и световой поток приобретает все более и более красноватый оттенок.



Фиг. 197.

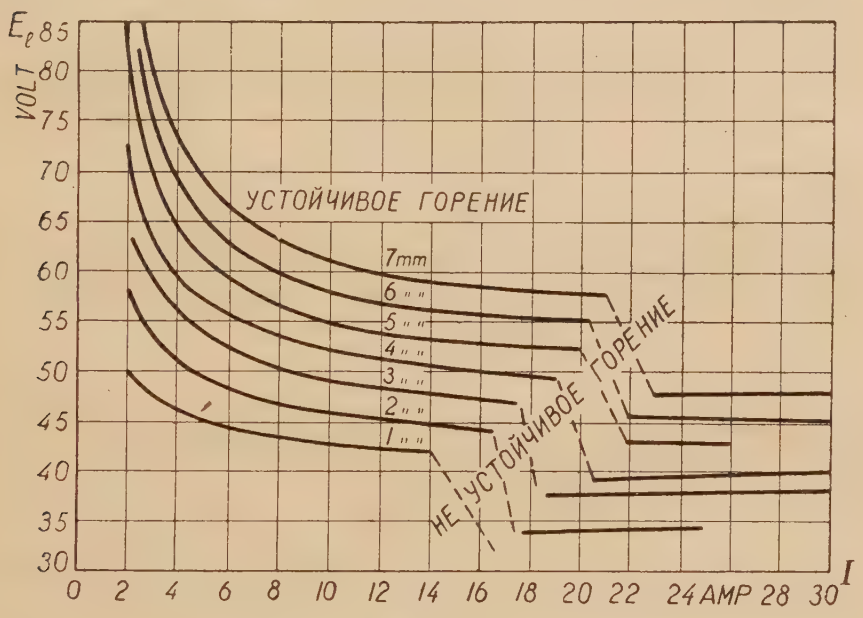
Что касается сопротивлений реостата, соответствующего включению того или иного числа групп, то значения таковых легко находятся по той же диаграмме фиг. 196. Так, например, если регулировка окраски световых лучей должна происходить при постоянном световом потоке, соответствующем горению одной группы ламп при номинальном напряжении без добавочного сопротивления, то необходимые для этой регулировки сопротивления реостата определятся по диаграмме фиг. 196, посредством абсцисс точек пересечения прямой, параллельной оси абсцисс и проведенной через ординату в 100 % светового потока, с кривыми, изображающими световой поток в функции сопротивления для различного числа групп. Для данного случая сопротивления реостата приобретают следующие значения (см. фиг. 196):

1 группа — $R_1 = 0$
2 группы — $R_2 = 11\ \%$
3 группы — $R_3 = 10\ \%$
4 группы — $R_4 = 8{,}5\ \%$
5 групп — $R_5 = 7{,}5\ \%$
6 групп — $R_6 = 6{,}0\ \%$

На фиг. 197 представлена схема включения групп ламп и ступеней реостата при регулировке окраски световых лучей. Для удобства управления обычно выключатели для групп ламп механически связываются с рукояткой регулирующего реостата.

§ 66. Регуляторы для дуговой лампы (балластные реостаты). — *a.* Общие свойства вольтовой дуги. — Как известно, электрические свойства дуговой лампы могут быть выражены посредством

так называемой статической характеристики, представляющей зависимость напряжения на зажимах лампы от силы тока. Эти характеристики для различных длин вольтовой дуги в графическом изображении имеют вид семейства кривых, представленных на диаграмме фиг. 198. Эти характеристики были впервые сняты ученой Айртон (Ayrton). Как видно из рассмотрения кривых фиг. 198, при постоянной длине вольтовой дуги (расстояние между углями) с увеличением силы тока напряжение вначале сильно падает, а затем почти



Фиг. 198.

не изменяется, при дальнейшем увеличении силы тока получается неспокойное горение дуги, и, наконец, при чрезмерно большой силе тока наблюдается шипение дуги.

Кривые фиг. 198 показывают также, что с увеличением длины напряжение возрастает.

Согласно исследованиям Айртон и Раша (Rasch) зависимость между напряжением, силой тока и длиной дуги, питаемой постоянным током, может быть выражена следующей формулой:

$$E_e = \alpha + \beta l' + \frac{\delta l'}{I},$$

где β, α и δ — постоянные, характеризующие свойства дуги, а l' — расстояние между основанием кратера положительного электрода и

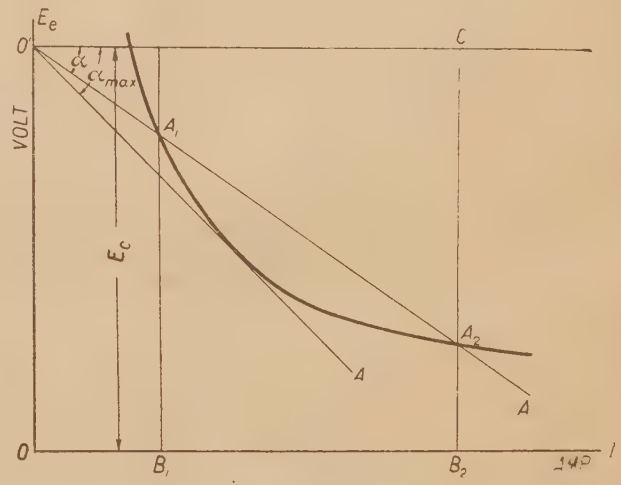
вершиной отрицательного электрода (см. фиг. 199). Для одинаковых угольных электродов:

$$\alpha = 36{,}59$$
$$\beta = 2{,}074$$
$$\delta = 10{,}5_4$$

Для углей с фитилем и для пламенных углей характеристики дуговой лампы имеют такой же вид, как и для однородных углей.

b. Определение сопротивления реостата. — Так как напряжение на зажимах дуговой лампы с увеличением силы тока уменьшается (падающая характеристика), то вольтова дуга не может гореть спокойно без добавочного сопротивления, включенного последовательно

Фиг. 199.



Фиг. 200.

с лампой. Пусть статическая характеристика дуговой лампы для заданного расстояния между электродами l' представлена кривой, изображенной кривой фиг. 200.

Если лампа питается от сети, напряжение которой равно E_e, то для того, чтобы горение лампы происходило при режиме, характеризующемся точкой A, необходимо в цепь лампы включить сопротивление R, числовое значение которого на диаграмме фиг. 200 представляется тангенсом угла α, образуемого прямой $\overline{O'A}$ с прямой параллельной оси абсцисс ($OO' = E_e$). В этом случае на диаграмме фиг. 200 отрезок $\overline{B_2A_2}$ изображает напряжение на зажимах дуги, а отрезок $\overline{A_2C}$ — падение напряжения в добавочном сопротивлении.

Как видно из фиг. 200, ординаты прямой $\overline{O'A}$, проведенной под углом α, которого $tg\alpha = R$, должны представлять $E = E_e - IR$ — на-

пряжение на зажимах лампы при различных силах тока. Эта прямая пересекает кривую характеристики вольтовой дуги в двух точках; это показывает, что горение лампы при данном напряжении сети E_e и включенном последовательно сопротивлении R возможно при двух режимах, — при силах тока I_1 и I_2. Аналитическое исследование электрического процесса дуговой лампы приводит к выводам, что для спокойного горения вольтовой дуги необходимо соблюдение условия, чтобы

$$R + \frac{dE_e}{dI} > 0,$$

т. е.. когда касательная, проведенная в точке A образует с осью абсцисс угол меньший чем α. На диаграмме фиг. 200 устойчивый режим соответствует точке A_2.

Если прямая $\overline{O'A}$ представляет касательную к кривой характеристики лампы, то этот случай соответствует включению наибольшего допустимого добавочного сопротивления R_{max}, при котором дуга может гореть (весьма устойчиво).

В этом случае

$$\operatorname{tg} \alpha_{max} = R_{max}$$

и

$$R_{max} = -\frac{dE_e}{dI},$$

так как

$$E_e = \alpha + \beta + \frac{\delta \cdot l'}{I},$$

то

$$\frac{dE_e}{dI} = -\frac{\delta \cdot l'}{I^2},$$

На основании этого следует, что:

1) наибольшая длина дуги l'_{max} при заданных значениях силы тока I и добавочного сопротивления R равняется:

$$l'_{max} = \frac{I^2 \cdot R}{\delta}; \qquad 373$$

2) меньшая сила тока дуги при заданных значениях l' и R составляет:

$$I_{min} = \pm \sqrt{\frac{\delta \cdot l'}{R}}; \qquad 374$$

3) наибольшее добавочное сопротивление при заданных I и l' должно быть равно:

$$R_{max} = \frac{\delta \cdot l'}{I^2}; \qquad 375$$

4) мощность, поглощаемая в добавочном сопротивлении, получается наименьшей, когда

$$I^2 \cdot R = \delta \cdot l. \qquad 378$$

Число ступеней реостата, включаемого в цепь дуговой лампы, определяется в зависимости от того, какую цель преследует реостат.

Если реостат предназначается для поддержания устойчивого горения лампы при определенном режиме в случае изменения напряжения питающей сети в пределах от E_k' до E_k'', то общее сопротивление реостата должно быть в пределах:

$$R' = \frac{E_k' - E_e}{I}$$

и

$$R'' = \frac{E_k'' - E_e}{I}$$

и

$$\Delta R = R' - R'' = \frac{E_k' - E_k''}{I}. \qquad 377$$

Задаваясь числом контактов $m + 1$, находят значения промежуточных ступеней:

$$r = \frac{\Delta R}{m} = \frac{R' - R''}{m} = \frac{E_k' - E_k''}{mI}. \qquad 378$$

(обычно сопротивления промежуточных ступеней выполняются равными).

Значения сопротивлений реостата для каждого положения подвижного контакта определяются по формулам:

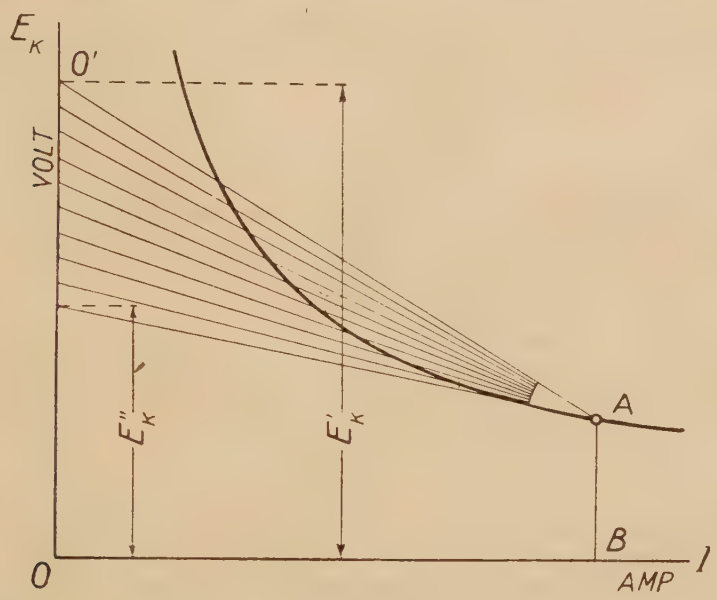
$$\left.\begin{aligned} R_1 &= R' \\ R_2 &= R' - r \\ R_3 &= R' - 2r \\ &\cdots\cdots \\ &\cdots\cdots \\ R_{m+1} &= R' - mr = R''. \end{aligned}\right\} \qquad 379$$

На фиг. 201 представлен чертеж, иллюстрирующий графический способ определения сопротивления реостата для поддержания устойчивого горения дуговой лампы при заданном режиме. Сущность этого способа легко понятна из чертежа, поэтому пояснения здесь не приводятся.

В случае, если реостат предназначается для регулировки силы света дуговой лампы, то сопротивления отдельных ступеней реостата

находятся в зависимости от того, при каких условиях должна гореть лампа. Обычно горение дуговой лампы, допускающей регулировку силы света может происходить или при постоянной длине дуги, или при постоянном напряжении на зажимах самой лампы. Последние условия горения лампы имеют место в большинстве случаев тогда, когда лампа снабжена автоматическим регулятором.

При постоянном расстоянии между электродами световой поток дуговой лампы почти прямо пропорционален силе тока, причем увеличение светового потока происходит при меньших силах тока в



Фиг. 201.

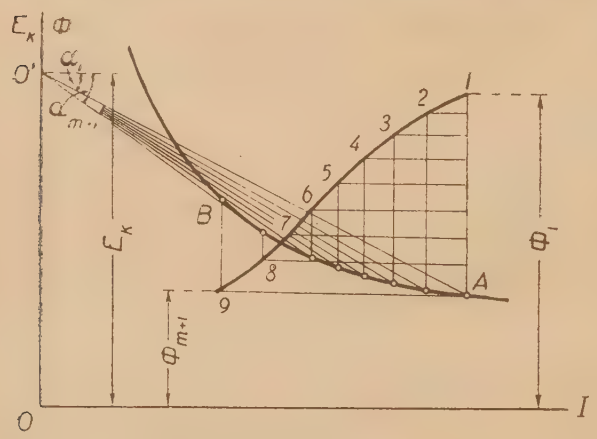
несколько большей степени, а при больших силах тока в несколько меньшей степени. Если же устанавливать соотношения между напряжением и силой тока путем изменения расстояния между электродами так, чтобы мощность, поглощаемая дуговой лампой, была постоянной, то световой поток достигает наибольшего значения лишь при определенной напряжении и силе тока.

Пусть требуется определить сопротивления ступеней реостата для случая регулировки светового потока в пределах от Φ_1 до Φ_{m+1} при постоянном расстоянии между электродами дуговой лампы. На фиг. 202 представлена статическая характеристика для этого рода лампы, а также зависимость Φ от I. На этой диаграмме световой поток Φ_1 соответствует точке A кривой статической характеристики, а световой поток Φ_{m+1} точке B той же кривой. Для поддержания устойчивого

горения лампы при постоянном напряжении сети E_k необходимо в цепь лампы включить сопротивление $R_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$ и $R_{m+1} = \operatorname{tg} \alpha_2$; таким образом при регулировке светового потока в пределах от Φ_1 до Φ_{m+1} сопротивление реостата должно изменяться от R_1 до R_{m+1}. Если регулировка светового потока осуществляется равномерными скачками, причем каждая ступень изменения светового потока равна $\Delta\Phi$, то число ступеней тогда составляет:

$$m = \frac{\Phi_1 - \Phi_{m+1}}{\Delta\Phi}.$$

Графический метод, как видно из фиг. 202, не позволяет с достаточной точностью определить сопротивления отдельных ступеней добавочного реостата для дуговой лампы.



Фиг. 202.

Если сделать допущение, что световой поток изменяется в зависимости от силы тока по закону прямой линии, т. е.

$$\Delta\Phi = \frac{\Phi_1 - \Phi_{m+1}}{m} = c\,\frac{I_1 - I_{m+1}}{m},$$

то определение сопротивлений отдельных ступеней реостата можно произвести аналитическим способом.

При постоянном расстоянии между электродами напряжение на зажимах вольтовой дуги в зависимости от силы тока может быть выражено так:

$$E_e = a + \frac{b}{I},$$

где a и b — постоянные, характеризующие электрические свойства дуги.

Так как две точки, характеризующие предельные режимы дуги заданы, то на основании этих условий можно легко найти постоянные a и b.

Действительно, если известны E_1, I_1 и E_{m+1}, I_{m+1}, то

$$E_1 = a + \frac{b}{I_1}$$

$$E_{m+1} = a + \frac{b}{I_{m+1}},$$

откуда

$$b = I_1 \cdot I_{m+1} \frac{E_1 - E_{m+1}}{I_{m+1} I_1}$$

и

$$a = E_1 - I_{m+1} \frac{E_1 - E_{m+1}}{I_{m+2} - I_1} = E_{m+1} - I_1 \frac{E_1 - E_{m+1}}{I_{m+1} - I_1}$$

Для первого положения подвижного контакта сопротивление реостата составляет:

$$R_1 = \frac{E_k - E_1}{I_1} = \frac{E_k}{I_1} - \frac{E_1}{I_1},$$

это сопротивление является и первой ступенью реостата, т. е. $R_1 = r_1$

Для второго положения — сопротивление равно:

$$R_2 = \frac{E_k - E_2}{I_2} = \frac{E_k - E_2}{I_2 - \Delta I}.$$

Так как

$$E_2 = a + \frac{b}{I_2} = a + \frac{b}{I_1 - \Delta I}$$

$$E_2 = E_1 - I_{m+1} \frac{E_1 - E_{m+1}}{I_{m+1} - I_1} + \frac{I_1 \cdot I_{m+1} (E_1 - E_{m+1})}{(I_{m+1} - I_1)(I_1 - \Delta I)} =$$

$$= \frac{E_1 \cdot I_1}{I_1 - \Delta I} + \frac{(E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}) \Delta I}{(I_{m+1} - I_1)(I_1 - \Delta I)},$$

где

$$\frac{I_{m+1} - I_1}{\Delta I} = -m,$$

тогда последнее выражение принимает вид:

$$E_2 = \frac{E_1 \cdot I_1}{I_1 - \Delta I} - \frac{E_1 I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - \Delta I)}$$

и, следовательно,

$$R_2 = \frac{E_k}{I_1 - \Delta I} - \frac{E_2}{I_1 - \Delta I} = \frac{E_k}{I_1 - \Delta I} - \frac{E_1 \cdot I_1}{(I_1 - \Delta I)^2} + \frac{(E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1})}{m(I_1 - \Delta I)^2}.$$

Отсюда находится сопротивление первой промежуточной ступени (вообще же второй):

$$r'_1 = R_2 - R_1 = \frac{E_k}{I_1 - \Delta I} - \frac{E_1 \cdot I_1}{(I_1 - \Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - \Delta I)^2} - \frac{E_k}{I_1} + \frac{E_1}{I_1} =$$

$$= \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - \Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1 [(I_1 - \Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1^2 (I_1 - \Delta I)^2} + \frac{E_k \cdot \Delta I}{I_1 (I - \Delta I)}.$$

Аналогично этим выводам выражение для сопротивления реостата и его ступеней для последующих положений подвижного контакта приобретает такой вид:

$$R_3 = \frac{E_k}{I_1 - 2\Delta I} - \frac{E_1 \cdot I_1}{(I_1 - 2\Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - 2\Delta I)^2};$$

$$\left.\begin{aligned} &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &R_k = \frac{E_k}{I_1 - (k-1)\Delta I} - \frac{E_1 I_1}{[I_1 - (k-1)\Delta I]^2} + \frac{E_2 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m[I_1 - (k-1)\Delta I]^2}; \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &R_{m+1} = \frac{E_k}{(I_1 - m\Delta I)} - \frac{E_1 \cdot I_1}{(I_1 - m\Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - m\Delta I)^2} = \frac{E_k}{I_{m+1}} - \frac{E_{m+1}}{I_{m+1}} \end{aligned}\right\} \quad 380$$

и

$$r_2' = R_3 - R_2 = \frac{E_1 I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - 2\Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1[(I_1 - 2\Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1^2 (I_1 - 2\Delta I)^2} + \frac{E_k \cdot 2\Delta I}{I_1(I - 2\Delta I)};$$

$$\left.\begin{aligned} &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &r'_{k-1} = R_k - R_{k-1} = \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m[I_1 - (k-1)\Delta I]^2} + \\ &\quad + \frac{E_1 \cdot I_1\{[I_1 - (k-1)\Delta I]^2 - I_1^2\}}{I_1^2[I_1 - (k-1)\Delta I]^2} + \frac{E_k(k-1)\Delta I}{I_1[I_1 - (k-1)\Delta I]} \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ &r'_m = R_{m+1} - R_m = \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m(I_1 - m\Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1[(I_1 - m\Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1^2[I_1 - (m)\Delta I]^2} + \\ &\quad + \frac{E_k \cdot m \cdot \Delta I}{I_1[I_1 - m\Delta I]}. \end{aligned}\right\} \quad 381$$

Если регулировка светового потока должна производиться при постоянном напряжении на зажимах дуговой лампы, то для изменения силы тока в пределах от I_1 до I_{m+1} (см. диаграмму фиг. 203) необходимо иметь в цепи лампы реостат, сопротивление которого можно было бы регулировать в пределах от $R_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$ до $R_{m+1} = \operatorname{tg} \alpha_{m+1}$, причем

$$R_1 = \frac{E_k - E_e}{I_1}$$

$$R_{m+1} = \frac{E_k - E_e}{I_{m+1}}.$$

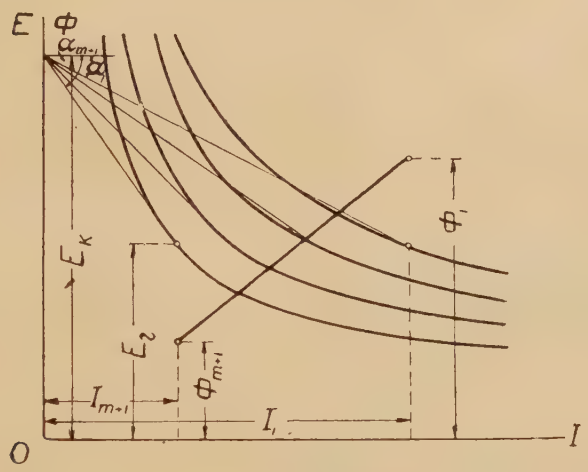
Так как в практических условиях регулировка светового потока дуговой лампы при постоянном напряжении на зажимах ее сопровождается небольшим изменением расстояния между электродами, то световой поток находится почти в прямолинейной зависимости от силы

тока. Таким образом, если регулировка светового потока должна осуществляться равномерными скачками, то необходимо силу тока в цепи также изменять равномерными скачками. Пусть равномерное изменение светового потока составляет:

$$\Delta\Phi = \frac{\Phi_1 - \Phi_{m+1}}{m}$$

и соответствующие этой величине ступени силы тока —

$$\Delta I = \frac{I_1 - I_{m+1}}{m}.$$



Фиг. 203.

При этих условиях сопротивления реостата для различных положений подвижного контакта должны быть равны:

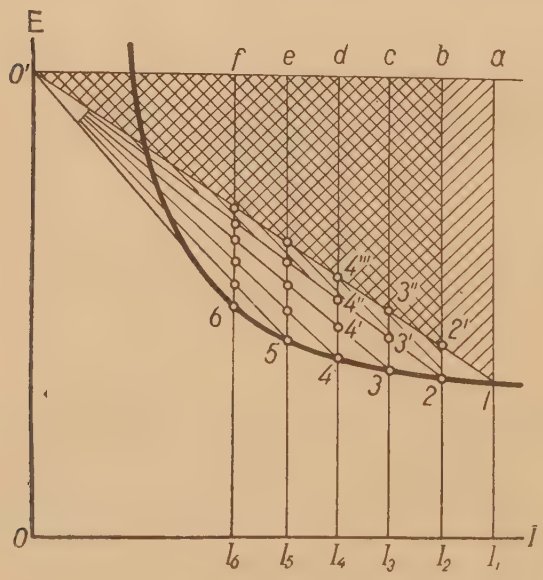
$$\left.\begin{aligned}
R_1 &= \frac{E_k - E_e}{I_1} \\
R_2 &= \frac{E_k - E_e}{I_2} = \frac{E_k - E_e}{I_1 - \Delta I} \\
R_3 &= \frac{E_k - E_e}{I_1 - 2\Delta I} \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots \\
R_m &= \frac{E_k - E_e}{I_1 - (m-1)\Delta I} \\
R_{m+1} &= \frac{E_k - E_e}{I_1 - m\Delta I} = \frac{E_k - E_e}{I_{m+1}},
\end{aligned}\right\} \quad 382$$

а сопротивления отдельных промежуточных ступеней составляют:

$$\left.\begin{aligned} r_1' &= R_2 - R_1 = (E_k - E_e)\left(\frac{1}{I_1 - \Delta I} - \frac{1}{I_1}\right) = \frac{(E_k - E_e)\Delta I}{I_1(I_1 - \Delta I)} \\ r_2' &= R_3 - R_2 = \frac{E_k - E_e}{I_1 - 2\Delta I} - \frac{E_k - E_e}{I_1 - \Delta I} = \frac{(E_k - E_e)\Delta I}{(I_1 - \Delta I)(I_1 - 2\Delta I)} \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ r_m' &= R_{m+1} - R_m = \frac{(E_k - E_e)\Delta I}{[I_1 - (m-1)\Delta I](I_1 - m\Delta I)}. \end{aligned}\right\} \quad 383$$

Более просто значения сопротивлений реостата находятся графическим способом, изображенным на диаграмме фиг. 206.

c. Мощность, поглощаемая ступенью реостата, получается наибольшей тогда, когда подвижной контакт стоит на контакте данной ступени; это легко установить при рассмотрении фиг. 204. При включении первой ступени реостата поглощаемая мощность в реостате пропорциональна площади треугольника *Ea1*; при втором положении подвижного контакта мощность, поглощаемая во всем реостате, выражается площадью треугольника *E2b*; при этом мощность, поглощаемая в 1-й ступени, соответствует площади △-ка *E2'b*, а мощность, поглощаемая во второй ступени (или в первой промежуточной) — площади △-ка *E22'*. Так как площадь △-ка *E2'b* менее площади △-ка *Ea1*, то следует, что поглощаемая мощность в первой ступени получается наибольшей тогда, когда включена лишь только эта ступень. Из дальнейшего рассмотрения диаграммы легко притти к заключению, что поглощаемая мощность каждой ступени приобретает наибольшее значение в начале включения этой ступени.



Фиг. 204.

Если регулировка светового потока производится при постоянной длине дуги лампы, то мощность, поглощаемая ступенью реостата, равняется

$$P = I^2 \cdot r.$$

Пользуясь ранее выведенными формулами, находят:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1 = I_1^2 \cdot r_1 = (E_k - E_e) I_1;$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot r_1' = \frac{(E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} I_{m+1}) I_2^2}{m(I_1 - \Delta I)^2} + \frac{E_1 \cdot I_1 [(I_1 - \Delta I)^2 - I_1^2] I_2^2}{I_1^2 (I_1 - \Delta I)^2} +$$

$$+ \frac{E_k \cdot \Delta I}{I_1 (I_2 - \Delta I)} = \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m} + \frac{E_1 \cdot I_1 [(I_1 - \Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1^2} + \frac{E_k \cdot \Delta I \cdot I_2}{I_1} =$$

$$= \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m} + \frac{E_1 [(I_1 - \Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1} + \frac{E_k \cdot \Delta I (I_1 - \Delta I)}{I_1},$$

$$P_3 = I_3^2 r'_2 = \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m} + \frac{E_1 [(I_1 - 2\Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1} + \frac{E_k \cdot \Delta I (I_1 - 2\Delta I)}{I_1};$$

. . . . . .

$$P_{m+1} = I_{m+1}^2 r'_m = \frac{E_1 \cdot I_1 - E_{m+1} \cdot I_{m+1}}{m} + \frac{E_1 [(I_1 - m\Delta I)^2 - I_1^2]}{I_1} +$$

$$+ \frac{E_k \cdot \Delta I (I_1 - m\Delta I)}{I_1}. \qquad 384$$

В случае регулировки светового потока при постоянном напряжении на зажимах дуговой лампы мощность, поглощаемая ступенями реостата, приобретает значения:

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= I_1^2 \cdot R_1 = (E_k - E_e) I_1. \\ P_2 &= \frac{(E_k - E_e)}{I_1} \Delta I (I_1 - \Delta I). \end{aligned}\right\} \qquad 385$$

$$\left.\begin{aligned} P_3 &= (E_k - E_e) \frac{\Delta I}{I_1 - \Delta I} (I_1 - 2\Delta I). \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ P_{m+1} &= (E_k - E_e) \frac{\Delta I}{[I_1 - (m-1)\Delta I]} (I_1 - m\Delta I). \end{aligned}\right\} \qquad 385a$$

Зная поглощаемые мощности, можно легко рассчитать в тепловом отношении элементы сопротивлений каждой ступени реостата, причем расчет здесь проводится для случая продолжительной нагрузки каждой ступени.

*

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

РЕОСТАТЫ С ЭКОНОМИЧЕСКИМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛА

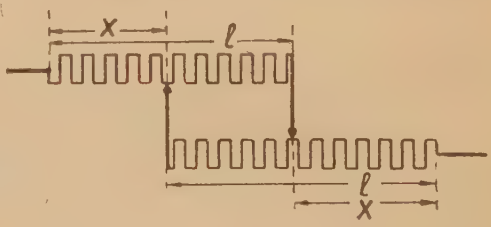
*

§ 67. Реостаты для плавной регулировки.— При обычном способе регулирования силы тока в какой-либо цепи часть сопротивления выключается или коротко замыкается так, что на ступенях низшего сопротивления большая часть материала остается не использованной (фиг. 205).

Фиг. 205.

Как видно из фиг. 205, подвижной контакт скользит по проволоке сопротивления так, что лежащая от него вправо часть сопротивления не включена.

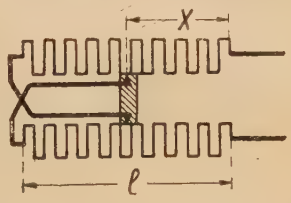
Материал сопротивления, очевидно, при этом способе используется не полностью и, именно, тем менее, чем шире пределы регулировки и чем чаще низшая ступень сопротивления, несущая к тому же наибольший ток, должна включаться. Развивающаяся в сопротивлениях теплота должна при этом выделяться в сравнительно небольшой части аппарата.



Фиг. 206.

Однако использование материала сопротивления значительно улучшается, если применять не одну, а две ветви, от которых один конец каждой ветви соединяется с контактом, скользящим с целью изменения сопротивления по другой ветви, как показано на фиг. 206. При этом соединении все части сопротивления обтекаются током на всех ступенях. Как видно из фиг. 206, части ветвей на длине $(l - x)$ соединены параллельно, остальные (x) — последовательно.

На ступени наибольшего сопротивления ($x = l$) обе ветви включены последовательно, т. е. расположение сопротивлений получается то же, что и при обыкновенном включении (фиг. 205). На ступени самого низшего сопротивления ($x = 0$) обе ветви включаются параллельно. При практическом выполнении устраивают обе ветви по отношению друг к другу, как показано на фиг. 207, где оба подвижных контакта, из которых каждый несет вдвое меньший ток, чем контакт на фиг. 205, жестко изолированно связаны на одной ползушке и могут перемещаться, следовательно, одновременно в одном направлении.



Фиг. 207.

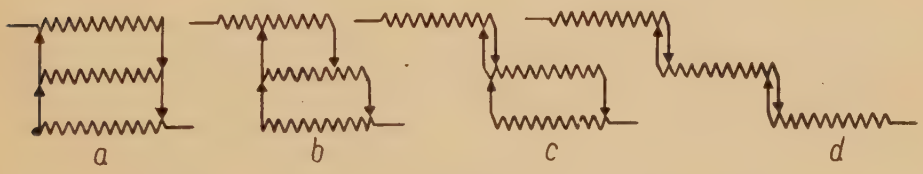
Если обозначить посредством R сопротивление каждой из обеих равных по величине ветвей, то сопротивление реостата, как функция положения x перемещающейся контактной пары, может быть представлено посредством уравнения:

$$r = \left(\tfrac{1}{2} + \tfrac{3}{2}\frac{x}{l}\right)R \qquad 386$$

и оно лежит в пределах

$$\tfrac{1}{2}R < r < 2R.$$

Таким образом, как показывает последнее соотношение, сопротивление изменяется только внутри предельного отношения $\tfrac{1}{4}$.



Фиг. 208.

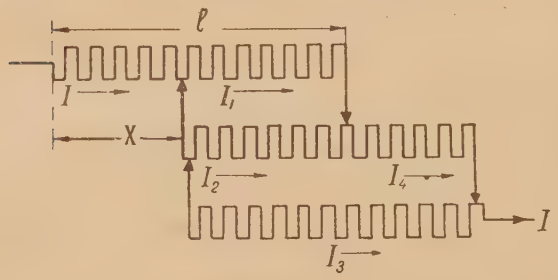
Чтобы получить еще бо́льшую область регулировки, применяют большее число ветвей сопротивления, соединяя их таким образом, что конец первой ветви соединяется с контактом, скользящим по второй ветви (см. фиг. 208a—d), концы второй ветви с контактами, которые скользят по первой и третьей ветви, и т. д. и, наконец, конец последней ветви соединяется с контактом, скользящим по предпоследней ветви.

Так получается включение, например, трех и четырех ветвей сопротивления, схема которого представлена на фиг. 208a—d.

Отношение между наибольшим и наименьшим значением сопротивления получается равным квадрату числа ветвей, т. е. в последнем случае 9;

в таком же соотношении находятся удельные тепловые нагрузки материала сопротивлений для низких ступеней материала при обычном (фиг. 208) и новом включении.

При применении трех ветвей сопротивления можно различать две области регулирования. В первой области (фиг. 208*a*—*c*) контакты, которые соединяют друг с другом вторую и третью ветви, остаются в покое, а контакты, соединяющие первую и вторую ветви, перемещаются; во второй области регулировки (фиг. 208 *c* — *d*) получается обратное явление, т. е. контакты, соединяющие первую и вторую ветви, пройдя свой путь, остаются в покое и начинают перемещаться контакты, соединяющие вторую и третью ветви.



Фиг. 209.

Согласно обозначениям фиг. 209, в первой области регулировки тока в отдельных частях сопротивлений можно выразить при помощи уравнений:

$$\left.\begin{aligned} I_1 = I_2 &= \frac{1}{3+\frac{x}{l}} I \\ I_3 &= \frac{1+\frac{x}{l}}{3+\frac{x}{l}} I \\ I_1 + I_2 = I_4 &= \frac{2}{3+\frac{x}{l}} I \end{aligned}\right\} \qquad 387$$

и зависимость сопротивления от положения контакта представляется таким образом:

$$r = \frac{x}{l} + \left[\frac{1+\frac{x}{l}}{3+\frac{x}{l}}\right] R, \qquad 388\text{ a}$$

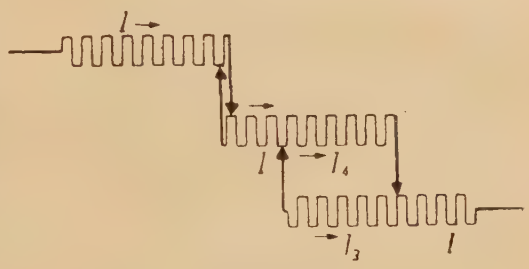
где R есть сопротивление одной ветви.

Сопротивление второй области регулировки (фиг. 210) может быть так же просто выражено, как и в случаях двух ветвей (фиг. 206), по-

средством уравнения:

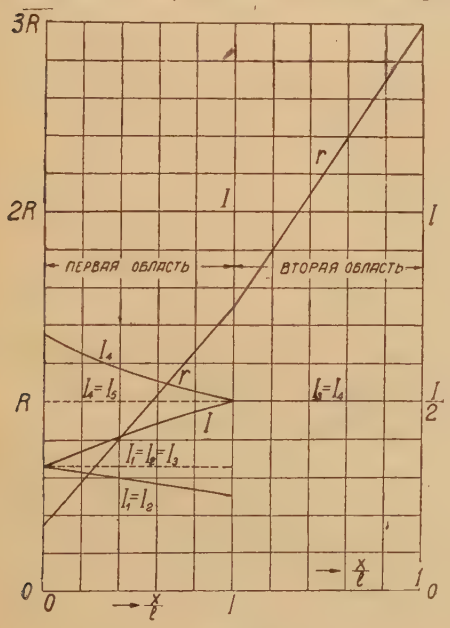
$$r = \left(\frac{3}{2} + \frac{3}{2}\frac{x}{l}\right) R. \qquad 388b$$

На фиг. 211 представлена диаграмма, показывающая, как изменяются токи и сопротивления в зависимости от положения контакта x для обеих областей регулировки. Если принять общую силу тока I — постоянной, то, согласно уравнению 2, токи изменяются по кривым, указанным сплошной линией.



Фиг. 210.

На диаграмме (фиг. 211) указано также пунктирной линией изменение сил тока в том случае, если контакт C_1 (фиг. 212), скользящий по второй ветви сопротивления, жестко в механическом и электрическом отношении соединить с контактом C'_1, скользящим по третьей ветви. Сопротивление реостата в первой области регулировки является также линейной функцией положения контакта x. Эта функция мало отличается от таковой, изображенной на фиг. 211 посредством кривой r и относящейся к схеме соединения фиг. 209, поэтому предпочитают выбирать всегда простейшую схему соединения (фиг. 209).

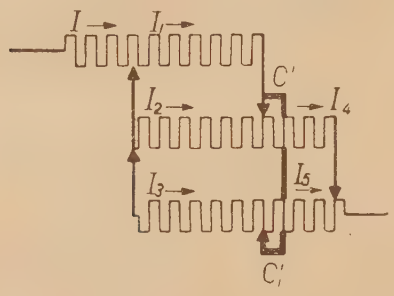


Фиг. 211.

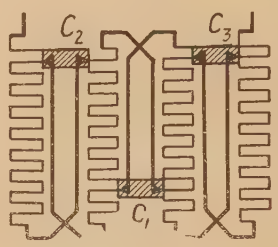
Остается наконец разобрать практически важное включение с четырьмя ветвями сопротивления. Это включение для одного из различных положений контактов представлено на фиг. 214. Здесь можно различать три области регулировки. В первой области контакты перемещаются между второй и третьей ветвями, во второй — между второй и первой и в третьей области — между третьей и четвертой. Практическое выполнение этого включения

представлено на фиг. 213, где на низшей ступени сопротивления контактная пара C_1 находится внизу, а контактные пары C_2 и C_3 наверху.

В первой области регулировки контактная пара C_1 перемещается вверх, во второй области контакты C_2 и в третьей контакты C_3 — вниз.



Фиг. 212.



Фиг. 213.

Если придерживаться обозначений фиг. 214, то для первой области регулировки выражения для токов в отдельных частях сопротивлений представляются в виде следующих уравнений:

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \left(\frac{1}{4}+\frac{x}{4l}\right) I. \\ I_2 &= \left(\frac{3}{4}-\frac{x}{4l}\right) I. \\ I_3 &= \left(\frac{1}{4}-\frac{x}{4l}\right) I. \end{aligned}\right\} \qquad 389$$

и

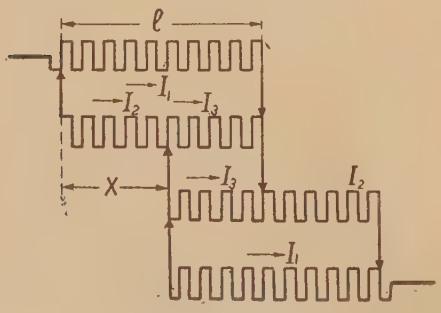
$$r = \left[\frac{1}{4}+\frac{x}{l}-\frac{1}{4}\left(\frac{x}{l}\right)^2\right] R. \qquad 390$$

Во второй и третьей областях регулировки по параллельным ветвям проходит половина общего тока (см. фиг. 214); сопротивление во второй области регулирования изменяется согласно уравнению:

$$r = \left(1+\frac{3}{2}\frac{x}{l}\right) R, \qquad 391$$

и в третьей области:

$$r = \left(\frac{5}{2}+\frac{3}{2}\frac{x}{l}\right) R. \qquad 392$$



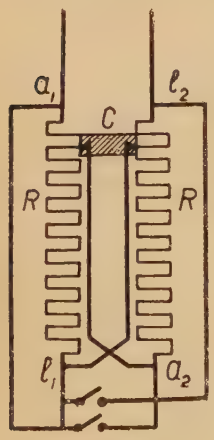
Фиг. 214.

В схеме фиг. 215 соединение больше четырех ветвей сопротивлений редко является необхо-

димым. Наоборот, часто приходится желать регулировать сопротивление до нуля. В этом случае рекомендуется развивать еще одну дальнейшую область регулирования. Для этого в ветвь сопротивлений вводится еще двухполюсный выключатель (фиг. 215) или два дополнительных скользящих контакта (фиг. 216).

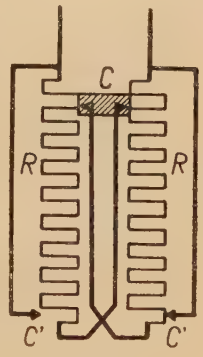
Для получения нижней области регулирования по фиг. 215 концы a_1 и l_1 соединяются посредством двухполюсного выключателя соответственно с концами a_2 и l_2.

Если контактная пара C стоит внизу, сопротивление аппарата равно нулю. При перемещении контактной пары C вверх сопротивление от нуля постепенно увеличивается, и в верхнем положении контактов оно равно $\frac{R}{2}$. (R — сопротивление одной ветви.) Если теперь посредством выключателя разорвать контакт и перемещать двойной контакт вниз, то сопротивление продолжает возрастать и в нижнем положении скользящего контакта достигает максимального своего значения $2R$.



Фиг. 215.

При включении, согласно фиг. 216, вместо двойного выключателя применены скользящие контакты C_1.



Фиг. 216.

В изображенном на фиг. 216 положении сопротивления реостата коротко замкнуты. Для увеличения сопротивления контакты C_1 должны перемещаться вверх. В верхнем их положении сопротивление реостата, очевидно, равно $\frac{R}{2}$.

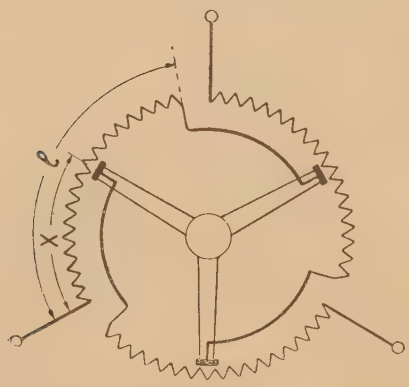
Если теперь контактная пара C начнет перемещаться вниз, то будет иметь место нормальная область регулировки (фиг. 210). В нижнем положении контактной пары C сопротивление достигает своего максимума, т. е. $2R$.

Оба включения (фиг. 215 и 216) дают, однако, в нижней области регулировки недостаточно хорошее использование материала, так как часть сопротивления сильно нагружается, тогда как другая или совсем разгружена (фиг. 215), или нагружена незначительно (фиг. 216).

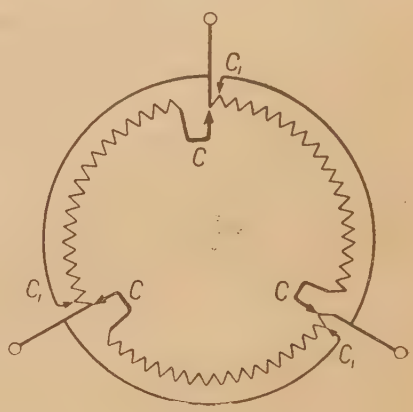
Описанные выше схемы включения, применяемые для постоянного тока и для однофазного переменного, не применяются для цепей трехфазного тока.

С целью осуществления экономического использования материала в реостатах, включаемых в трехфазные цепи, можно соединить три ветви сопротивления так, что при низшем сопротивлении они соединяются в треугольник и постепенно переходят в звездообразное включение, причем в промежуточных положениях имеет место смешанное включение, как изображено на фиг. 217. Если обозначить посредством R сопротивление одной ветви, то в положении контактов x сопротивление ветви, приведенное к равнозначащему соединению в звезду, равно:

$$r = \left(\frac{x}{l} + \frac{1}{3}\,\frac{l-x}{l}\right) R = \left(1 + 2\,\frac{x}{l}\right)\frac{R}{3} \qquad 393$$



Фиг. 217.



Фиг. 218.

и оно лежит в пределах

$$\frac{R}{3} < r < R. \qquad 394$$

Чтобы иметь возможность регулировать сопротивление трехфазного реостата до нуля, можно на низшей ступени сопротивления (включение треугольником) постепенно замыкать накоротко или выключать совсем.

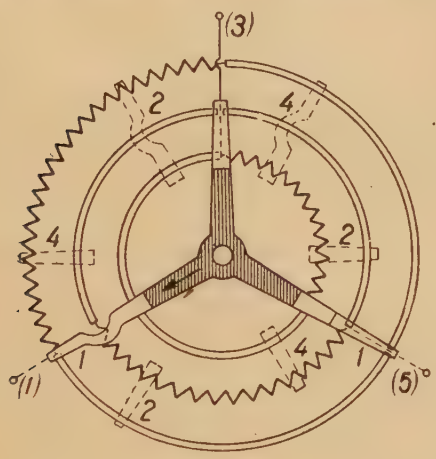
На фиг. 218 представлено для примера такое включение, где сопротивления замыкаются накоротко и сопротивление аппарата равно нулю.

Посредством поворота контактов C_1 по направлению часовой стрелки сопротивление реостата постепенно растет. При повороте контактов C_1 на 120° имеет место включение ветвей в треугольник и сопротивление, приведенное к звезде в этом положении, равно $\frac{R}{3}$. Если теперь поворачивать контакты C в том же направлении, сопротивление продолжает расти и при повороте на 120° достигает максимального значения, т. е. R. Сопротивление последней области регулировки, как

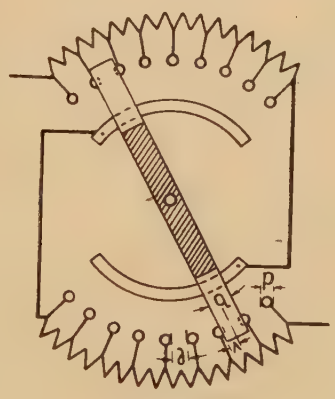
уже говорилось, изменяется согласно уравнению 393; сопротивление первой же области, т. е. при регулировке от $r=0$ до $r=\frac{R}{3}$, следует уравнению:

$$r=\frac{x}{l}\frac{R}{3} \qquad 395$$

Техническое выполнение принципиальной схемы, изображенной на фиг. 217, представлено на фиг. 219; при указанном на этой фигуре положении три контакта рычага (полож. 1) замыкают накоротко сопротивления. Если контактный рычаг перемещать по направлению стрелки часов, сопротивление постепенно возрастает. Например, в означенном на фиг. 219 пунктиром положении 2 части сопротивлений



Фиг. 219.



Фиг. 220.

(1) — 2, (3) — 2 и (5) — 2 включены в треугольник, остальные же 2 — (3) и т. д. еще остаются коротко замкнутыми.

После поворота контактного рычага на 120° все сопротивления оказываются включенными в треугольник (рычаг, обозначенный стрелкой, занимает положение (3). При дальнейшем вращении контактного рычага получается смешанное включение, в положении, например, 4 части сопротивлений (1) — 4 включены в звезду, остальные в треугольник. После того как рычаг поворачивается на 240°, все сопротивления включаются в звезду; реостат имеет в этот момент наибольшее сопротивление ($r=R$). Означенный стрелкой рычаг занимает тогда положение (5).

§ 68. Реостаты для ступенчатой регулировки. — На практике в большинстве случаев регулирование сопротивления производится скачками, или, как говорят, сопротивление изменяется ступенями. Такой ступенчатый реостат с двумя ветвями сопротивления может быть

выполнен так, как это представлено на фиг. 220. Если обозначить посредством m общее число частей сопротивления обеих ветвей (на фиг. 220 $m = 16$), то число положений подвижного контакта может быть определено из соотношения:

$$z = \frac{m}{2} + 1. \qquad 396$$

Если считать число положений возрастающим от 1 до z, т. е., что 1-му положению соответствует наименьшее сопротивление, то число частей сопротивления, включенных параллельно на ν-й ступени, выразится

$$q = m - 2(\nu - 1), \qquad 397$$

остальные

$$m - q = 2(\nu - 1) \text{ последовательно.} \qquad 398$$

В предположении, что все ступени сопротивлений имеют одно и то же сопротивление:

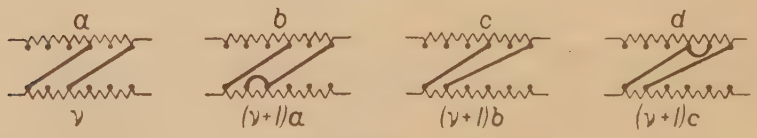
$$r_0 = \frac{2}{m} R, \qquad 399$$

общее сопротивление реостата на ν-й ступени может быть представлено соотношением:

$$r_\nu = \left[\frac{1}{2} + \frac{3(\nu - 1)}{m}\right] R = \left[\frac{m}{4} + \frac{3}{2}(\nu - 1)\right] r_0. \qquad 400$$

Разность между значениями сопротивлений следующих друг за другом ступеней выражается:

$$r_{\nu+1} - r_\nu = \frac{3}{m} R = \frac{3}{2} r_0 \qquad 401$$



Фиг. 221.

Как видно, эта величина остается постоянной независимо от положения контакта.

Если один из рычагов (фиг. 220) получает опережение по отношению к другому рычагу, так что $b - e < v < d - b + 2l$, то для всех ступеней получаются еще три промежуточных положения, изображенные на фиг. 221 *a-d*.

Обозначая посредством q опять число частей параллельно включенных сопротивлений на ν-й ступени, сопротивления трех переходных

положений от ν-й к $(\nu+1)$-й ступени можно выразить так:

$$r_{(\nu+1)a} = r_\nu - \frac{q}{2m(q-1)} R = r_\nu - \frac{q}{4(q-1)} r_0 \qquad 402a$$

$$r_{(\nu+1)b} = r_\nu + \left[\frac{2}{m} - \frac{q}{2m(q-1)}\right] R = r_s + \left(1 - \frac{q}{4(q-1)}\right) r_0 \qquad 402b$$

$$r_{(\nu+1)c} = r_\nu + \frac{R}{m} = r_\nu + \frac{1}{2} r_0 \qquad 402c$$

Величины сопротивлений $r_{(\nu+1)a}$ и $r_{(\nu+1)}$ зависят от q и лежат в пределах:

$$r_\nu - \frac{1}{2} r_0 < r_{(\nu+1)a} < r_\nu - \frac{1}{4} r_0 \qquad 403a$$

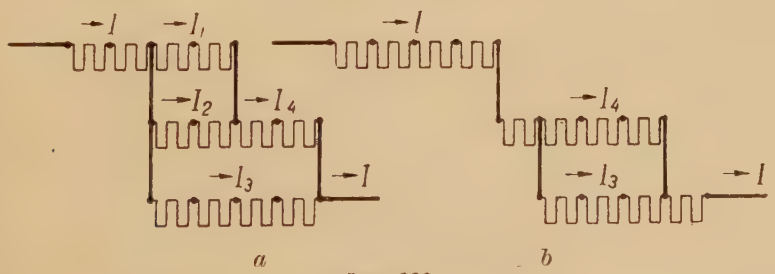
$$r_\nu + \frac{1}{2} r_0 < r_{(\nu+1)b} < r_\nu + \frac{3}{4} r_0 \qquad 403b$$

Самое меньшее возможное число для q это 2 и очень большое число q в отношении $\frac{q}{q-1}$ можно принимать равным единице, таким образом получаются пределы.

И по уравнению 401:

$$r_{(\nu+1)} = r_\nu + \frac{3}{2} r_0 \qquad 403c$$

Величина сопротивлений переходных положений $(\nu+1)b$ и $(\nu+1)c$ лежит, таким образом, всегда между крайними значениями (положения



Фиг. 222.

ν и $\nu+1$), в то время как сопротивление положения $(\nu+1)a$ на незначительную величину лежит ниже ν, т. е. $r_\nu > r_{(\nu+1)}a$.

При ступенчатой регулировке с тремя ветвями сопротивления (фиг. 208 a — d) для каждой из обеих областей регулировки требуется контактный аппарат, изображенный на фиг. 220. Если обозначить опять посредством m общее число отдельных частей сопротивлений n, следовательно, при помощи $\frac{m}{3}$ — число отдельных частей

каждой ветви сопротивления, то общее возможное число положений или ступеней находится из соотношения:

$$z = 2\frac{m}{3} + 1, \qquad 404$$

и число положений или ступеней в каждой из обеих областей регулировки:

$$z_1 = z_2 = \frac{m}{3} + 1, \qquad 405$$

где последнее положение первой области регулировки z_1 — совпадает с 1-м положением второй области. Если все ступени имеют одно и то же сопротивление, то для ν-го положения в первой области регулировки тока в отдельных частях ветвей (фиг. 222*а*) определяется из уравнений:

$$\left.\begin{aligned} I_1 = I_2 &= \frac{1}{3 + 3\frac{\nu - 1}{m}} I = \frac{m}{3(m + \nu - 1)} I \\ I_3 &= \frac{1 + \frac{3(\nu - 1)}{m}}{3 + \frac{3(\nu - 1)}{m}} I = \frac{m + 3(\nu - 1)}{3(m + \nu - 1)} I \\ I_4 &= \frac{2}{3 + \frac{3(\nu - 1)}{m}} I = \frac{2m}{3(m + \nu - 1)} I \end{aligned}\right\} \qquad 406$$

и сопротивление

$$r_\nu = \left[\frac{3(\nu - 1)}{m} + \frac{1 + \frac{3(\nu - 1)}{m}}{3 + \frac{3(\nu - 1)}{m}}\right] R =$$

$$= \left[\frac{m}{9} + (\nu - 1)\left(1 + \frac{2m}{9(m + \nu - 1)}\right)\right] r_0, \qquad 407$$

где R сопротивление одной ветви и следовательно

$$r_0 = \frac{3R}{m} \qquad 408$$

сопротивление одной ступени.

Разница между сопротивлениями $(\nu + 1)$-й и ν-й ступени выражается:

$$r(\nu + 1) - r_\nu = \left[1 + \frac{2m^2}{9(m + \nu)(m + \nu - 1)}\right] r_0, \qquad 409$$

оно лежит для первой области регулировки для различных друг за другом следующих ступеней всегда внутри границ

$$\left(1+\frac{m}{8m+6}\right)r_0 < r_{(\nu+1)} - r_\nu < \left(1+\frac{2m}{9m+9}\right)r_0. \qquad 410$$

Во второй области регулировки (фиг. 222 *b*) ток в параллельно включенных ветвях равен половине главного тока; сопротивление же во второй области на ν-й ступени выразится:

$$r_\nu = \left[\frac{3}{2}+\frac{9(\nu-1)}{2m}\right]R = \left\{\frac{m}{3}+\left[\frac{m}{6}+\frac{3}{2}(\nu-1)\right]\right\}r_0 \qquad 411$$

Разница в сопротивлениях друг за другом следующих ступеней остается все время постоянной и равна

$$r_{(\nu+1)} - r_\nu = \frac{3}{2}r_0.$$

Для четырех подразделений ветви сопротивления (фиг. 222 *a* и *b*), т. е. $m = 12$, токи и сопротивления отдельных ступеней реостата даны в таблице 33.

Таблица 33

Ступень	ν	$\frac{I_1}{I}=\frac{I_2}{I}$	$\frac{I_3}{I}$	$\frac{I_4}{I}$	$\frac{r}{r_0}$	$r_{\nu+1}-r_\nu$
Первая область	1	$^4/_{12}=0{,}333$	$^4/_{12}=0{,}333$	$^8/_{12}=0{,}667$	$1^4/_{12}=1{,}333$	1,205
	2	$^4/_{13}=0{,}308$	$^5/_{13}=0{,}385$	$^8/_{13}=0{,}615$	$2^7/_{13}=2{,}540$	1,176
	3	$^4/_{14}=0{,}285$	$^6/_{14}=0{,}430$	$^8/_{14}=0{,}570$	$3^{10}/_{14}=3{,}715$	1,152
	4	$^4/_{15}=0{,}266$	$^7/_{15}=0{,}466$	$^8/_{15}=0{,}534$	$4^{13}/_{15}=4{,}87$	1,134
	5	$^4/_{16}=0{,}250$	$^8/_{16}=0{,}500$	$^8/_{16}=0{,}500$	$5^{16}/_{16}=6{,}00$	
Вторая область	1	1 и $^1/_2$			6,00	1,5
	2				7,50	1,5
	3				9,00	1,5
	4				10,50	1,5
	5				12,00	

При ступенчатой регулировке с четырьмя ветвями сопротивлений для каждой из трех областей регулировки требуются контактные устройства, изображенные на фиг. 220. Если обозначить общее число

отдельных частей сопротивлений реостата посредством m, то общее число положений или ступеней:

$$z = \frac{3m}{4} + 1. \qquad 412$$

В каждой из трех областей регулировки число положений:

$$z_1 = z_2 = z_3 = \frac{m}{4} + 1, \qquad 413$$

где z_1-е положение первой области совпадает с первым — второй и z-е положение второй совпадает с первым положением третьей.

Токи в отдельных частях сопротивлений в первой области регулировки для ν-го положения (см. фиг. 214):

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= \left(\frac{1}{4} + \frac{\nu - 1}{m}\right) I \\ I_2 &= \left(\frac{3}{4} - \frac{\nu - 1}{m}\right) I \\ I_3 &= \left(\frac{1}{4} - \frac{\nu - 1}{m}\right) I \end{aligned}\right\} \qquad 414$$

и сопротивление

$$r_\nu = \left[\frac{1}{4} + \frac{4(\nu - 1)}{m} - 4\,\frac{(\nu - 1)^2}{m^2}\right] R = \left[\frac{m}{16} + \left(1 - \frac{\nu - 1}{m}\right)(\nu - 1)\right] r_0 \qquad 415$$

где R сопротивление одной из четырех ветвей и $r_0 = \frac{4R}{m}$ сопротивление одного деления.

Разница в сопротивлениях $(\nu + 1)$-й и ν-й ступени определяется:

$$r_{\nu - 1} - r_\nu = \left(1 - \frac{2\nu - 1}{m}\right) r_0. \qquad 416$$

Эта разница лежит для различных друг за другом следующих ступеней всегда внутри границ:

$$\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{m}\right) r_0 < r_{\nu + 1} - r_\nu < \left(1 - \frac{1}{m}\right) r_0. \qquad 417$$

Во второй области регулировки сопротивление ν-й ступени:

$$r_\nu = \left[1 + \frac{6(\nu - 1)}{m}\right] R = \left[\frac{m}{4} + \frac{3}{4}(\nu - 1)\right] r_0 \qquad 418$$

и в третьей области:

$$r_\nu = \left[\frac{5}{2} + \frac{6(\nu-1)}{m}\right] R = \left[\frac{5}{8} m + \frac{3}{2}(\nu - 1)\right] r_0. \qquad 419$$

Разница сопротивлений между двумя друг за другом следующими ступенями в обеих последних областях регулировки постоянна и равна:

$$r_{\nu+1} - r_\nu = \frac{3}{2} r_0. \qquad 420$$

Для четырех разделений ветви сопротивления ($m = 16$) токи и сопротивления для различных ступеней представлены в таблице 34.

Таблица 34

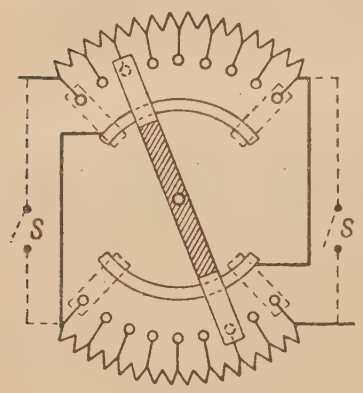
Ступень	ν	$\frac{I_1}{I}$	$\frac{I_2}{I}$	$\frac{r}{r_0}$	$\frac{r}{r_0}$	$r_{\nu+1} - r_\nu$
1-я область	1	$^4/_{16} = 0{,}256$	$^{12}/_{16} = 0{,}750$	$^4/_{16} = 0{,}256$	1,00	0,94
	2	$^5/_{16} = 0{,}312$	$^{11}/_{16} = 0{,}690$	$^3/_{16} = 0{,}188$	$1^{13}/_{16} = 1{,}94$	0,81
	3	$^6/_{16} = 0{,}375$	$^{10}/_{16} = 0{,}625$	$^2/_{16} = 0{,}125$	$2^3/_4 = 2{,}75$	0,69
	4	$^7/_{16} = 0{,}438$	$^9/_{16} = 0{,}561$	$^1/_{16} = 0{,}0625$	$3^7/_{16} = 3{,}44$	0,56
	5	$^8/_{16} = 0{,}500$	$^8/_{16} = 0{,}500$	0,000	4,00	
2-я область	1	1 и $^1/_2$			4,00	1,5
	2				5,50	1,5
	3				7,00	1,5
	4				8,50	1,5
	5				10,00	
3-я область	1	1 и $^1/_2$			10,0	1,5
	2				11,5	1,5
	3				13,0	1,5
	4				14,5	1,5
	5				16,0	

Применение вышеописанных схем ступенчатого реостата позволяет осуществить также и плавные регулирования сопротивления до нуля. Примерное выполнение такой регулировки представлено для двух ветвей сопротивления на фиг. 223 и 224.

При соединении, указанном на фиг. 223, выключатель S, при нижней области регулировки, замыкается. Если контактный рычаг стоит

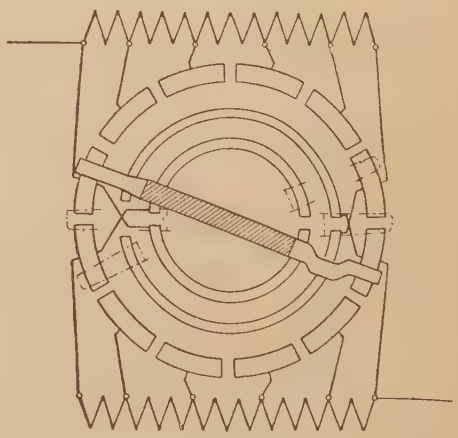
в крайнем правом положении, как указано пунктиром на фиг. 223, сопротивление реостата равно нулю.

При повороте контактного рычага против стрелки часов число коротко замкнутых частей сопротивления постепенно уменьшается. В означенном пунктиром конечном положении обе ветви сопротивления включены параллельно. После этого контакт S разрывается и вводится верхняя область регулирования. Контактный рычаг в этой области перемещается по стрелке часов до крайнего означенного начального положения, при котором обе ветви сопротивления включаются последовательно. Таким образом части сопротивлений, которые в нижней области регулировки разгружены,— коротко замкнуты, в верхней сильнее нагружены как включенные последовательно.



Фиг. 223.

При включении согласно фиг. 224 контактный рычаг в обеих областях регулировки перемещается в одном и том же направлении. В означенном на фиг. 224 положении рычага сопротивление реостата равно нулю. Вправо лежащий контактный рычаг скользит по внешнему контактному кольцу, другой влево — по внутреннему. Если контактный рычаг вращается по часовой стрелке, число включенных частей сопротивления постепенно увеличивается. В означенном пунктиром положении обе ветви сопротивления включаются параллельно.


Фиг. 224.

При повороте контактного рычага дальше по стрелке часов сопротивления постепенно переходят из параллельного включения в последовательное. После второго оборота, в том же означенном пунктиром положении, все сопротивления включены последовательно, и реостат имеет максимальное сопротивление.

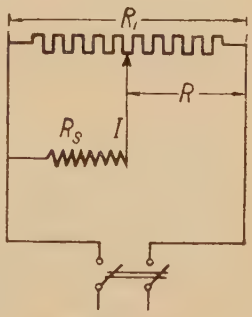
*

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ОСОБЫЕ ВИДЫ РЕОСТАТОВ

*

§ 69. Реостаты для широкой регулировки силы тока.— Часто на практике является желательным регулировать напряжение машины в очень широких пределах, начиная от нуля. В этих случаях собственное возбуждение машины не применимо, так как известно, что при некоторых значениях напряжения (около колена нагрузочной характеристики машины), при очень незначительном изменении сопротивления, напряжение на клеммах машины делает очень большие скачки. Таким образом собственное возбуждение преимущественно применяется там, где напряжение на клеммах машины должно оставаться приблизительно постоянным. В подобных же случаях, когда требуются широкие пределы регулирования напряжения, прибегают к помощи постороннего возбуждения машины от некоторого независимого источника электричества с постоянным, а иногда и с переменным напряжением (сист. Леонарда) на зажимах. Однако в этом случае при обычном способе регулирования для плавного изменения напряжения от максимума до нуля пришлось бы приключать весьма большое сопротивление в цепь возбуждения. Материал сопротивления в этом случае плохо бы использовался, и регулятор получил бы слишком большие размеры.



Фиг. 225.

Эти затруднения можно обойти, если применить включение регулятора потенциометром. При этом сопротивление регулятора приключается на полное напряжение, а обмотка возбуждения (фиг. 225) одним своим концом — к одному из полюсов питающей возбуждение сети, а другим — к перемещающемуся контакту, скользящему по сопротивлению регулятора. При таком включении очевидно, что возбуждение машины может регулироваться от полного максимального значения и до нуля.

Расчет сопротивления регулятора в этом случае проще всего проводится графически. Наносится сначала характеристика холостого хода машины и находится общее сопротивление регулятора. После этого подсчитывают для каждого тока возбуждения соответствующее ступени регулятора и наносят найденные величины сопротивления R в функции силы тока возбуждения I_m.

На основании закона Ома следует (см. фиг. 225):

$$I_m \cdot R_s = E_k - I \cdot R = (I - I_m)(R_1 - R). \qquad 421$$

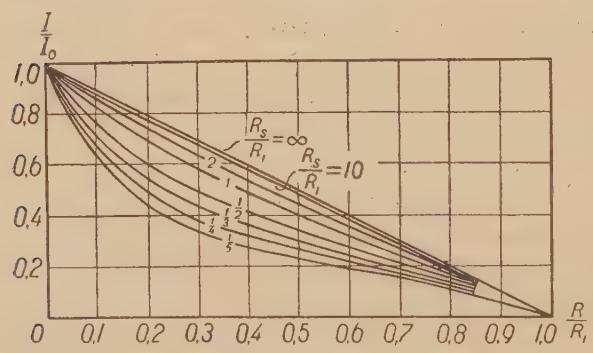
Решение этих двух уравнений дает:

$$I_m = \frac{E_k(R_1 - R)}{R \cdot R_1 - R^2 + R_1 \cdot R_s} \qquad 422$$

$$I = \frac{E_k(R_1 - R + R_s)}{R_1 \cdot R - R^2 + R_1 \cdot R_s}. \qquad 423$$

Уравнение 422 дает соотношение, при помощи которого является возможным для каждой силы тока возбуждения подсчитать соответствующее сопротивление R.

Если задано допустимое значение ступеней изменения напряжения машины, то является возможным, при помощи характеристики холостого хода и найденной кривой $I_m = f(R)$, найти соответствующие сопротивления регулятора, а следовательно, и сопротивления отдельных его ступеней (если регулятор ступенчатый).



Фиг. 226.

Чтобы определить необходимое количество материала сопротивления для каждой ступени, нужно знать для каждой ступени наибольшее значение силы тока. Значение этого тока определяется посредством выражения 423, в зависимости от сопротивления.

На фиг. 226 дана зависимость отношения $\frac{I_m}{I_0}$ от $\frac{R}{R_1}$ для различных значений $\frac{R_s}{R_1}$, где $I_0 = \frac{E_k}{R_s}$ есть наивысшее возможное значение силы тока возбуждения. Эта зависимость показывает, что при больших значе-

ниях величины $\frac{R_s}{R_1}$ или, следовательно, при малых значениях сопротивления R_1, ток возбуждения I_m приближается к линейной функции от R. При очень высоких значениях сопротивления R_1 (т. е. малых значениях $\frac{R_s}{R_1}$), напротив, изменение силы тока от сопротивления значительно отклоняется от прямолинейного закона. В начале регулировки, т. е. при малом соотношении $\frac{R}{R_1}$, ток изменяется значительно сильнее, чем при больших значениях $\frac{R}{R_1}$.

Определение объёмной мощности и потерь. — Наибольшая сила тока в каждой ступени сопротивляемости наступает тогда, когда подвижной контакт стоит на этой ступени. Сила тока, протекающая по данной ступени, равна тогда I (уравн. 423), и объемная мощность регулятора определяется по уравнению:

$$P = \int_0^{R_1} I^2 \cdot dR. \qquad 424$$

Если в последнее уравнение подставить вместо I его значение из уравнения 423 и обозначить посредством $P_s = \frac{E_k^2}{R_s}$ наибольшие потери в обмотке возбуждения, то при постоянном напряжении сети E_k интеграл в предыдущем выражении можно представить в виде:

$$\frac{P}{P_s} = 1 + \frac{2a^2}{4a+1} + \frac{4a^3}{(4a+1)^{3/2}} \ln \frac{\sqrt{4a+1}+1}{\sqrt{4a+1}-1}, \qquad 425$$

где a означает отношение $\frac{R_s}{R_1}$.

На фиг. 227 нанесены значения $\frac{P}{P_s}$ как функции $a = \frac{R_s}{R_1}$ и $\frac{1}{a}$; последняя функция $\frac{1}{a}$ введена для того, чтобы иметь возможность уместить на диаграмме всю кривую в пределах изменения $\frac{R_s}{R_1}$ от 0 до ∞.

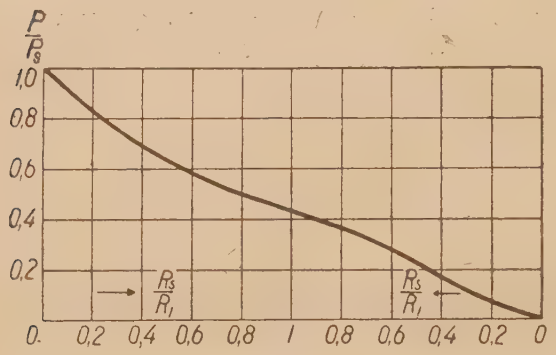
Потери в регуляторе для некоторого положения подвижного контакта, определяющие его повышение температуры, могут быть выражены уравнением $P_v = I^2 \cdot R + (I - I_m)(R_1 - R)$; последнее выражение при помощи уравнений 422 и 423 можно преобразовать в следующий вид:

$$P_v = \frac{E_k^2}{R_1}\left[1 + \frac{R(R_1 - R)^3}{(R_1 \cdot R - R^2 + R_1 \cdot R_s)^2}\right] \qquad 426$$

Как видно из этого уравнения, потери в регуляторе равны $\frac{E_k^2}{R_1}$, когда подвижной контакт его стоит так, что или $R=0$ или $R=R_1$, т. е. в начале и в конце регулировки. Во всех промежуточных положениях потери представляют бо́льшую, чем эту, величину; они являются наибольшими, если удовлетворяется следующее равенство:

$$R(R_1-R)=R_s(R_1-4R). \qquad 427$$

Из последнего равенства видно без дальнейшего, что наибольшие потери во всех случаях имеют место в первой четверти области регулировки $\left(r<\frac{R_1}{4}\right)$.



Фиг. 227.

Дальнейшее простое преобразование уравнения 426 легко приводит к результату, что наибольшие потери при всех обстоятельствах меньше, чем величина:

$$\left(\frac{E_k^2}{R_1}+\frac{1}{4}\frac{E_k^2}{R_s}\right).$$

Если, таким образом, обозначить через V_m наибольшие потери, то можно написать следующее соотношение:

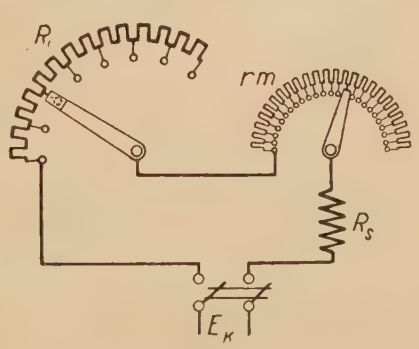
$$\frac{E_k^2}{R_1}<V_m<\left(\frac{E_k^2}{R_1}+\frac{1}{4}\frac{E_k^2}{R_s}\right).$$

Последнее соотношение может быть проверено каким-либо числовым примером следующим образом: по уравнению 427 подсчитывают сначала значение R для заданных величин R_s и R_1, и после при помощи уравнения 426 уже является возможным подсчитать соответствующие максимальные потери в регуляторе.

Из предыдущих рассмотрений следует, что, кроме величины сопротивления регулятора, необходимо считаться с величиной регулятора, т. е. количеством материала и, следовательно, первоначальными затратами; с другой стороны — с потерями в регуляторе, обусловливающими эксплоатационные затраты, которые тем менее, чем больше величина R_1. С другой стороны, как видно из предыдущего, регулировка получается тем лучше, чем меньше сопротивление R_1. Между этими противоположными требованиями нужно установить некоторое равновесие. Наиболее благоприятные соотношения, удовлетворяющие эти оба требования,

колеблются в пределах $\frac{R_1}{R_s} = 2 - 5$; если это отношение брать больше, то получается слишком искаженная кривая зависимости силы тока от сопротивления (фиг. 226), что нежелательно; если же отношение это брать меньше указанных пределов, то имеют место слишком большие потери в регуляторе.

§ 70. Комбинированные реостаты для грубой и тонкой регулировки. — Чтобы получить регулирующий реостат с большим числом ступеней сопротивления и в то же время с малым, сравнительно, числом контактов, поступают следующим образом: делят общее необходимое сопротивление R_1 на небольшое число грубых ступеней n, и последовательно к этому сопротивлению приключается еще сопротивление с мелкими подразделениями, которое дает возможность при каждом переключении грубой ступени подрегулировать необходимую силу тока в цепи.



Фиг. 228.

Такое включение представлено на фиг. 228.

Для получения плавности изменения сопротивления необходимо, чтобы сопротивление реостата для тонкой регулировки было равно сопротивлению одной ступени реостата для грубой регулировки. Таким образом, если сопротивление каждой ступени тонкой регулировки равно r, то сопротивление ступени грубой регулировки, равное $\frac{R_1}{n}$, может быть подразделено при помощи тонкой регулировки на $\frac{R^1/n}{r}$ ступеней, однако тонкая регулировка может иметь на одну ступень меньше, чем дает последнее соотношение, так как одна ступень может образовываться грубым регулятором при переключении его ступени, если одновременно вводится или выводится (в зависимости от увеличения или уменьшения общего сопротивления) полное сопротивление тонкого регулятора.

При таком условии имеет место равенство:

$$\frac{R_1}{n} = (m + 1)\, r, \qquad 428$$

где m — есть число ступеней тонкой регулировки.

За расчетный ток для ступеней сопротивления грубого регулятора берется ток, который имеет место в цепи с совершенно выключенным сопротивлением тонкого регулятора.

Таким образом для ν-й ступени можно написать:

$$I_\nu = \frac{E_k}{\frac{\nu}{n} R_1 + R_s}, \qquad 429$$

где E_k — напряжение на зажимах и R_s — сопротивление обмотки возбуждения.

Наибольшая поглощаемая мощность ν-й ступенью реостата, которая определяет количество необходимого материала, таким образом равняется:

$$P_\nu = \frac{E_k^2 \frac{R_1}{n}}{\left(\frac{\nu}{n} R + R_s\right)^2}. \qquad 430$$

Если эту величину подсчитать для всех ступеней и просуммировать найденные значения, то получится та поглощаемая мощность, которая определяет общее количество материала сопротивления, т. е. объемная мощность:

$$P_1 = \sum_{\nu=1}^{n} \frac{E_k^2 \frac{R_1}{n}}{\left(\frac{\nu}{n} R + R_s\right)^2}. \qquad 431$$

Для тонкого регулятора за расчетную силу тока принимается та, которая имеет место тогда, когда в цепи остается включенным только реостат с тонкой регулировкой и совершенно выключается грубый регулятор.

Этот ток равен:

$$I_\mu = \frac{E_k}{\mu R + R_s} \qquad 432$$

для μ-й ступени сопротивления. Величина же тонкого регулятора получается аналогичным образом как и для грубого регулятора, т. е.

$$P_2 = \sum_{\mu=1}^{m} \frac{E_k^2 \cdot R}{(\mu R + R_s)^2}. \qquad 433$$

Однако суммирования путем подсчета и сложения мощности поглощаемых отдельными ступенями реостата, как это приходится

делать в грубых регуляторах, здесь можно избегнуть, предположив, что ступени сопротивления тонкого регулятора бесконечно малы и имеет место как бы плавная регулировка. Тогда объемная мощность тонкого регулятора может быть представлена в виде выражения:

$$P_2 = \int_0^{\frac{R_1}{n}} I^2 \cdot dR,$$

где R, стоящее под интегралом, есть часть сопротивления тонкого регулятора, по которому проходит ток I. Сила этого тока достигает наибольшего значения тогда, когда грубый регулятор совершенно выключен и равен, и она равна:

$$I = \frac{E_k}{R + R_s}.$$

Если положить напряжение на зажимах постоянным, то получается:

$$P_2 = \int_0^{\frac{R_1}{n}} \frac{E_k^2\, dR}{(R + R_s)^2} = - E_k^2 \left[\frac{1}{R + R_s}\right]_0^{\frac{R_1}{n}},$$

После подстановки пределов и некоторых преобразований последнее выражение принимает вид:

$$P_2 = \frac{E_k^2}{R_s} \frac{R_1}{R_1 + nR_s} \qquad 434$$

Главная выгода такого устройства регулятора, т. е. последовательное включение сопротивлений для грубой и тонкой регулировки, как уже говорилось, состоит в том, что оно требует сравнительно небольшого числа контактов.

Общее сопротивление, которое может образовать данная система, очевидно, равно $(R_1 + mr)$ и общее число ступеней сопротивления, если принять во внимание уравнение 429, равняется:

$$N = n(m + 1) + m = (n + 1)(m + 1) - 1,$$

а число контактов, очевидно, равно:

$$K = (n + 1) + (m + 1).$$

Если выбрать, например, $n = 6$ и $m = 20$, то получается число ступеней равным $N = 146$ с числом контактов $K = 28$, таким образом большое число ступеней с небольшим числом контактов.

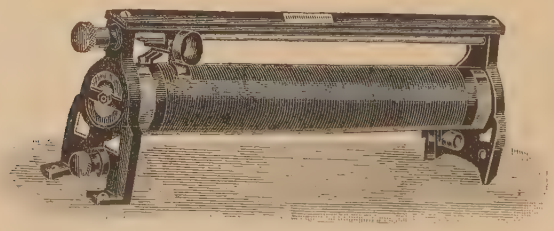
Однако возникает вопрос, какие следует выбирать числа ступеней грубого и тонкого регулятора, чтобы получить минимум соответствующего числа контактов. Как можно доказать простым подсчетом, минимальное число контактов соответствует тому случаю, когда $m = n$.

В самом деле, если, например, $m = n = 12$, то получается число контактов равным $K = 26$ и число ступеней $N = 168$; если же ступени распределить таким образом, что $m = 16$ и $n = 8$, то при том же, следовательно, числе контактов, как и в предыдущем случае, т. е. $K = 26$, общее число ступеней сопротивления регулятора составит $N = 152$ (на 16 меньше).

Практически задача выбора числа ступеней и их сопротивлений обычно решается следующим образом: по известным значениям наибольшего и наименьшего значения силы тока определяют общее сопротивление регулятора $(R_1 + mr)$; далее по наибольшему желаемому изменению силы тока при переключении находят сопротивление одной ступени r, при условии совершенно выключенного сопротивления грубой регулировки. По известному значению R определяют затем общее число ступеней N; после этого уже выбирают величину n при условии наиболее экономичного использования материала.

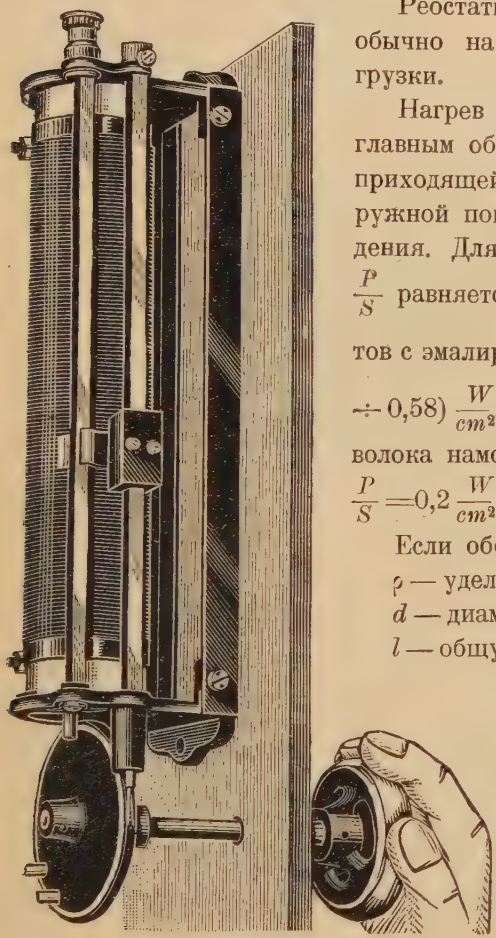
Недостатком этого устройства является то, что все ступени должны иметь одно и то же сопротивление; однако некоторые преимущества устройства регулятора с грубой и тонкой регулировкой, несмотря на этот недостаток, сделали ее довольно распространенной на практике.

§ 71. Реостаты со скользящим контактом (ползушкой). — Сопротивления со скользящим контактом находят в электротехнике многостороннее применение. Преимущество такого рода реостатов состоит в том, что они дают возможность плавно изменять сопротивление и сравнительно легко и просто монтируются благодаря простоте конструкции. Остовом для намотки материала сопротивления являются большей частью железные трубы, покрытые эмалью, цилиндры, полые или сплошные, сделанные из огнеупорного материала (фарфора, стеатита, шифера и т. д.), эмалированные или фарфоровые цилиндры; по обмотанному проволокой цилиндру скользит пружинящий контакт,



Фиг. 229.

сидящий на специальной токоведущей направляющей (см. фиг. 229). Общие виды реостатов с ползушкой представлены на фиг. 229—232, на фиг. 233 — снимок комбинированного реостата для грубой и тонкой регулировки, причем в этом приборе тонкая регулировка осуществляется посредством реостата ползушкой.



Фиг. 230.

Реостаты с ползушкой рассчитываются обычно на действие продолжительной нагрузки.

Нагрев реостата с ползушкой зависит главным образом от поглощаемой мощности, приходящейся на единицу площади наружной поверхности, и от условий охлаждения. Для реостатов с полым цилиндром $\frac{P}{S}$ равняется около $0{,}35\ \frac{W}{cm^2}$, для реостатов с эмалированной трубой — $\frac{P}{S} = (0{,}45 \div 0{,}58)\ \frac{W}{cm^2}$; для реостатов, у которых проволока намотана на сплошной цилиндр, — $\frac{P}{S} = 0{,}2\ \frac{W}{cm^2}$.

Если обозначить посредством:

ρ — удельное сопротивление материала,

d — диаметр проволоки,

l — общую длину намотанной проволоки,

D — внешний диаметр цилиндра, на который наматывается проволока,

n — число витков,

L — длину намотки,

то поглощаемую всем реостатом мощность можно выразить так:

$$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \frac{\rho l}{s} = I^2 \cdot \frac{\rho \pi n (D + d)}{\frac{\pi d^2}{4}} = Const.$$

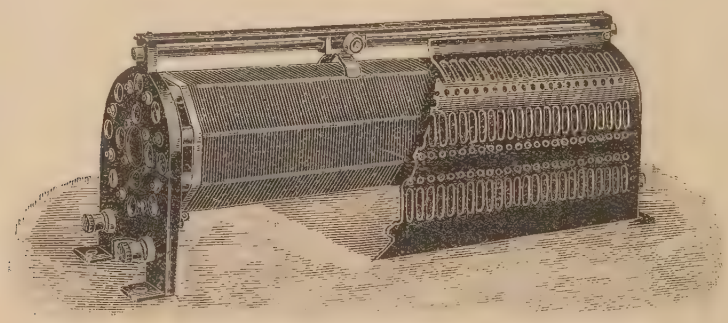
Или, так как $L = n \cdot d$,

$$P = \frac{4 I^2 \cdot \rho \cdot L (D + d)}{d^3} = Const.$$

Так как величиной d можно пренебречь по сравнению с D, то для какого-либо определенного типа реостата получается:

$$\frac{I^2}{d^3} = \frac{P}{4\rho \cdot L \cdot D} = \gamma = Const.$$

Этот коэффициент, который представляет собою как бы меру использования материала реостата, называется коэффициентом нагрузки.



Фиг. 231.

Средние значения коэффициента нагрузки для различных типов реостатов приведены в следующей таблице 35.

Таблица 35

Коэффициенты нагрузки для различных типов реостатов при условии повышения температуры проволоки на 200 °C

Типы реостатов	Сименс и Гальске (на стеат. полом цил.).	Рустрат (на жел. эмал. трубе)	Госуд. рентг. ин-та (на сплошн. цил. из шифера)
Значение $\gamma = \frac{I^2}{d^3}$ в $\frac{A^2}{mm^3}$	5,5÷6,3	7,7÷8,5	2,7÷5,1
Постоянные времени нагрева T в min.	13,5÷17,1	4,8÷11,5	51,3÷32,8

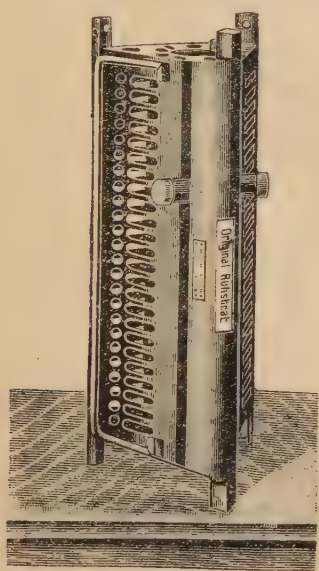
Эта таблица относится к реостатам с одним цилиндром. Для спаренных реостатов значения γ уменьшаются на 20÷30 %; при наличии кожухов значения γ снижаются на 15÷25 %.

При вертикальном положении цилиндров реостата охлаждение улучшается, вследствие этого постоянная γ вырастает (примерно на 25 %).

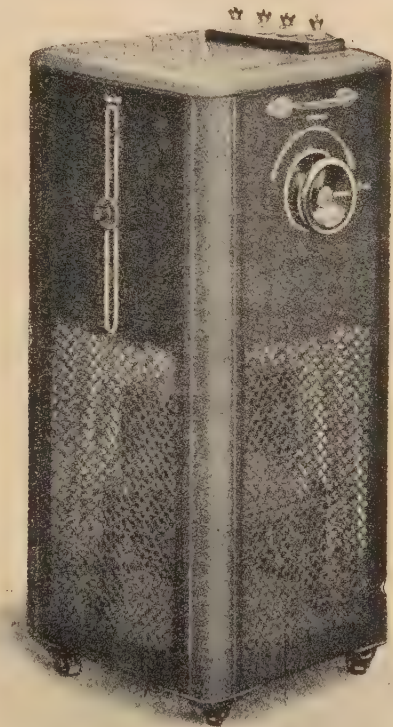
Расчет реостата с ползушкой производится следующим образом: по заданному значению I и выбранному типу реостата и роду материала для сопротивления находят диаметр проволоки d, пользуясь формулой:

$$d = \sqrt[3]{\frac{I^2}{\gamma}} \; mm.$$

Если дано общее сопротивление реостата R, то длина



Фиг. 232.



Фиг. 233.

намотки L при выбранном диаметре цилиндра D может быть подсчитана по формуле:

$$L = \frac{R \cdot d^3}{4\rho \cdot D}.$$

Последняя формула получается из равенства:

$$R = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\rho \, D \cdot n \cdot d}{d^3} = 4\rho \, \frac{D \cdot L}{d}.$$

В некоторых случаях, как, например, когда реостат вводится в цепь возбуждения электрических машин, или когда реостат служит в качестве светового регулятора, реостат приходится рассчитывать, исходя из заданных пределов изменения силы тока.

Таким образом, если реостат включен последовательно в цепь с каким-либо сопротивлением R_o, и напряжение сети равно E_k, то максимальное значение силы тока определяется из соотношения:

$$I_{max} = \frac{E_k}{R_o},$$

минимальное:

$$I_{min} = \frac{E_k}{R_o + R},$$

где R — есть сопротивление реостата,

тогда:

$$R = \frac{E_k - R_o I_{min}}{I_{min}} = \frac{E_k I_{max} - E_k I_{min}}{I_{min} \cdot I_{max}} = \frac{E_k (I_{max} - I_{min})}{I_{min} \cdot I_{max}},$$

Активная длина реостата определяется по формуле:

$$L = \frac{R \cdot d^3}{4\rho D},$$

или, заменяя сопротивление реостата его предыдущим выражением, получают:

$$L = \frac{E_k (I_{max} - I_{min}) \cdot d^3}{4\rho \cdot D \cdot I_{max} \cdot I_{min}}.$$

Если пределы регулировки $(I_{max} - I_{min})$ невелики и выражаются порядком не выше 10 %, то расчет реостата является возможным вести по нижнему пределу силы тока, т. е. по I_{min}, так как при выведении части сопротивления реостата оставшаяся часть его работает в более благоприятных условиях в смысле охлаждения, благодаря отводу тепла выведенной частью; следовательно, реостат может подвергаться несколько большей нагрузке.

Тогда последнее выражение может быть написано следующим образом:

$$L = \frac{E_k \cdot I_{min} \cdot (I_{max} - I_{min})}{4\rho \cdot D \cdot \gamma \cdot I_{max}} = \frac{P (I_{max} - I_{min})}{I_{max}} K,$$

где $$K = 4\rho \cdot D \cdot \gamma.$$

В случае больших областей регулировки силы тока является более рациональным разбить сопротивление на несколько реостатов и рассчитывать каждый для своей нагрузки, заключенной в пределах $I_{max} - I_{min}$.

*

БИБЛИОГРАФИЯ

Книги

E. Schupp. — „*Elektrische Schaltzeug*". — Изд. 1927 г.

R. Edler. — „*Schalterbau*", ч. I и II. — Изд. 1923 и 1927 гг.

P. Maurer. — „*Appareillage électrique*". — Изд. 1926 г.

R. Bardin. — „*Les rheostats et contrôleurs électriques*". — Изд. 1926 г.

E. Jasse. — „*Die Berechnung der Anlass- und Regelwiderstände*". — Изд. 1924 г.

A. Hagenbach. — „*Der elektrische Lichtbogen*". — Изд. 1924 г.

Правила и нормы

Regeln für Anlasser und Streuergeräte (REA) VDE 1928.

Règles françaises d'unification du materiel électrique.

Статьи

Retzow. — „*Beitrag zum Verhalten eines Widerstandsmaterials bei elektrischer und termischer Beanspruchung*". — E. T. Z. 1926 г., стр. 901.

A. Klein. — „*Beiträge zur Kenntnis von Widerstandsmaterialien*". — E.T.Z 1924 г., стр. 300.

„*Elektrische Heizgitter*". — E. T. Z. 1924 г., стр. 855.

Fr. Natalis — „*Die Entwickelung der Grossanlasser*". — Siemens Z. 1923 г., стр. 437.

„*Anlasser mit Sandkühlung*". — E. T. Z. 1922 г., стр. 544.

H. Franken. — „*Bewertung von Steuerwaltzen und Widerständen im aussetzenden Betrieb*". — E. T. Z. 1922 г., стр. 752.

Л. Дрейер. — „Фитильный жидкостный реостат". — Эл-во. 1926 г., стр. 442.

W. Wilson. — „*Some note on the design of liquid rheostats*". — J. I. E. E. 1922 г., стр. 196.

M. Keller. „*Grundlagen zur Lösung praktischer Erwärmungsfragen der Elektrotechnik*". Arch. f. E. 1924, т. XIII, стр. 226.

R. Richter — „*La courbe d'échauffement pour une charge fonction lineire du temps*". — R. G. E. 1924 г., т. XV, стр. 52 и E. T. Z. 1923 г., стр. 449.

E. Sieg. — „*Bestimmung der Erwärmung von Widerständen bei Belastung mit konstanter Stromstärke*". — E. T. Z. 1926 г., стр. 1297.

P. Henning. — „*Beitrag zur Ermittelung der Belastbarkeit von Widerständen in Abhängigkeit von der Zeitdauer und von der Temperatursteigerung*". — E. T. Z. 1925 г., стр. 995.

F. Stäblein. — *„Zusammenhang zwischen Belastungsstromstärke und Temperatur an frei ausgespanntem Widerstandsmaterial“*. — E. T. Z. 1924 г., стр. 495.

F. Kraus. — *„Die Grossenbestimmung von Dauerbelastungswiderständen“*. — E. u. M. 1922 г., стр. 431.

J. Hak. — *„Zur Berechnung der Anlasswiderstände eines Hauptstrommotors“*. — E. T. Z. 1926 г., стр. 1316.

W. Haage. — *„Die Berechnung von Anlasswiderständen nach den R. E. A.* — E. T. Z. 1924 г., стр. 975.

Hunnius. — *„Zur Berechnung des Anlassers eines Hauptstrommotors“*. — E. T. Z. 1923 г., стр. 381.

L. Binder. — *„Über die Bestimmung der Stufen von Anlasswiderständen“*. — El. Betrieb 1923, № 3 и. E. u. M. 1923, стр. 273.

Teubert. — *„Fluchtlineintafel für die Berechnung von Anlassern“*. — E. T. Z. 1923 г., стр. 85.

R. Hoerner. — *„Die Berechnung des Anlassers und der Regelung elektrischer Maschinen mit Vielfachwerten“*. — E. T. Z. 1922 г., стр. 1111.

A. I. Dover. — *„Chort method of calculating starting rheostats for direct-current motors“*. — J. I. E. E. 1922 г., стр. 867.

E. Jasse. — *„Der Anlassvorgang beim Gleichstrommotor“*. — Arch. f. El., 1917 г., т. V. стр., 285.

A. Leemann. — *„Calcul du nombre de plots des rheostats d'éxcitation“*. — R. G. E. 1925 г., т. XVI, стр. 505.

E. Poirson. — *„Note sur les interrupteurs d'éxcitation“*. — R. G. E. 1923 г., т. XIV, стр. 493.

N. Halbertsma et E. Matthews. — *„Methode de calcul des rheostats de réglage pour l'éclairage et son emploi pratique“*. — R. G. E. 1927 г., т. XXII, стр. 111.

H. Cohn. — *„Die Bemessung der Stufentwickelungen von Gleitwiderständen“*. — E. T. Z. 1927 г., стр. 1111.

R. Richter. — *„Schaltung von Regelungswiderstände zur Ersparniss von Widerstandsmaterial“*. — E. T. Z. 1921 г., стр. 217.

„Regeln für die Bewertung und Prüfung von Anlassern und Steuergeräten (R. E. A. 1928).“ — E. T. Z. 1927 г., стр. 625, 663, 952.

„Règles de normalisation du gros appareillage électrique“. — R. G. E. 1923 г. т. XIV, стр. 577.

F. Natalis. — *„Normung von Anlasser“*. — E. T Z. 1922 г., стр. 341.

*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

Проф. В. С. КУЛЕБАКИН

ИСПЫТАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Стр. XX + 1030. Ц. 14 р., в кол. пер. 15 р. 50 к.

Методы испытания и исследования электрических машин (постоянного и переменного тока) и трансформаторов, изложенные одним из виднейших специалистов. Для инженеров и студентов втузов.

Проф. В. С. КУЛЕБАКИН

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Расчетная записка осветительных и силовых трансформаторов

Стр. 95 + 1 табл. Ц. 1 р. 35 к.

Для инженеров, конструкторов, студентов электротехнической специальности. Формулы для определения главных размеров силовых и осветительных трансформаторов, основных параметров их магнитной и электрической цепей, для расчета на нагревание и на механическую прочность наиболее ответственных деталей трансформатора.

Проф. Ф. И. ХОЛУЯНОВ

АЛЬТЕРНАТОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА

Краткое руководство к теоретическ. и практическ. изучению их работы.
Стр. 198. Ц. 1 р. 50 к.

Проф. Ф. И. ХОЛУЯНОВ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Стр. 196. Изд. 2-е. С 108 фиг. Ц. 2 р. 50 к.

Ф. И. ХОЛУЯНОВ

ТРАНСФОРМАТОРЫ ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Краткое руководство к теоретическ. и практическ. изучению их работы.
Стр. 184. Издание 2-е. Ц. 2 р. 40 к.

СОДЕРЖАНИЕ: Часть I. Трансформирование однофазного тока. Трансформирование трехфазного тока однофазными трансформаторами. Трехфазные трансформаторы. Специальные случаи трансформирования трехфазного тока. Высшие гармоники и особенности соединений обмоток трехфазных трансформаторов. Потери энергии в трансформаторе. Параллельное включение трансформаторов. Автотрансформаторы и сериес-трансформаторы. Явления при включении, выключении и коротком замыкании трансформатора. Краткие сведения об устройстве и охлаждении трансформаторов. Потенциальные регуляторы. Часть II. Испытание трансформаторов. Коэффициент трансформации и внешняя характеристика. Исследование работы трансформатора по опытам холостой работы и короткого замыкания. Определение коэффициента полезного действия трансформатора и разделение потерь. Исследование нагрева и стойкости изоляции трансформатора. Прилож.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ МАГАЗИНАХ И ОТДЕЛЕНИЯХ ГОСИЗДАТА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

Проф. Б. И. УГРИМОВ

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Выпуск I

УЧЕНИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КРЕПОСТИ
ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА и ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ЭЛЕКТРОМЕТРИЯ

Стр. 151. Ц. 1 р. 75 к.

Выпуск II

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ

Составлено под редакцией проф. Б. УГРИМОВА, инж. В. П. ГОЛОВКИНА

Стр. 151. Ц. 1 р. 50 к.

Выпуск III

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ и БОРЬБА С НИМИ

Стр. 188. Ц. 1 р. 50 к.

Выпуск IV

РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, МАСЛЯНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ и РЕЛЕ

Составлено под редакцией Б. И. УГРИМОВА
инж.-электр. М. Ф. ПОЯРКОВЫМ

Стр. 159. Ц. 1 р. 75 к.

Проф. Б. И. УГРИМОВ и проф. Г. Г. ГЕНСЕЛЬ

ОСНОВЫ ТЕХНИКИ СИЛЬНЫХ ТОКОВ

Том первый. ПОСТОЯННЫЙ ТОК. Изд. 6-е

Стр. 518. Ц. 5 р., в пер. 5 р. 40 к., в кол. пер. 5 р. 75 к.

Том второй. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. Изд. 4-е, перераб. и дополн.

С многочисленными фигурами и чертеж. в тексте и на отд. листах

Стр. 597 + 3 табл. Ц. в пер. 7 р. 50 к.

Проф. А. А. СМУРОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
и ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Стр. VIII, 443. С 379 фигурами. Ц. 5 р. 75 к.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ МАГАЗИНАХ и ОТДЕЛЕНИЯХ ГОСИЗДАТА

Stanford University Libraries
3 6105 023 422 525